

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO
DE REFERÊNCIA PARA GNSS**

Autor: Naiara Bianchi

Orientador: Daniel Varela Magalhães

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
DINÂMICA E MECATRÔNICA**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

NAIARA BIANCHI

AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA GNSS

São Carlos, SP.

2024

NAIARA BIANCHI

AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA GNSS
EVALUATION OF A REFERENCE STATION FOR GNSS

Dissertação de mestrado apresentado a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a aprovação para a defesa do Título de Mestre em Ciências no Programa Engenharia Mecânica

Área de concentração: Dinâmica e Mecatrônica

Mestranda: Naiara Bianchi
Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

São Carlos, SP.
2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B113a Bianchi, Naiara
 AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA
 GNSS / Naiara Bianchi; orientador Daniel Varela
 Magalhães. São Carlos, 2024.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de
 Concentração em Dinâmica e Mecatrônica -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2024.

 1. GNSS. 2. Relógio atômico. 3. Precisão. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Tecnóloga **NAIARA BIANCHI**.

Título da dissertação: "AVALIAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA GNSS".

Data da defesa: 03/05/2024.

Comissão Julgadora**Resultado**

Prof. Associado Daniel Varela Magalhães

(Orientador)

(Instituto de Física de São Carlos/IFSC-USP)

APROVADA

Profa. Associada Liliane Ventura Schiabel

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. Luiz Vicente Gomes Tarelho

(INMETRO - Rio)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

Agradecimentos

Agradeço sinceramente a todos os envolvidos no processo de elaboração desta dissertação, pois sem o apoio e contribuição de cada um de vocês, este trabalho não teria sido concluído com sucesso.

Primeiramente, expresso minha gratidão ao meu orientador, pelo tempo dedicado, pela orientação valiosa e pela paciência em guiar-me ao longo desta jornada acadêmica. Seu conhecimento e sua visão foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Gostaria de agradecer aos professores e membros da banca examinadora, por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação do trabalho. Suas contribuições críticas e sugestões construtivas foram essenciais para aprimorar a qualidade desta dissertação.

Agradeço aos colegas e amigos, que me acompanharam durante todo o percurso do mestrado. A troca de ideias, as discussões e o apoio mútuo foram fundamentais para enfrentar os desafios e superar as dificuldades encontradas ao longo do caminho.

Não posso deixar de expressar minha gratidão à USP, pelos recursos e oportunidades proporcionados durante meu período de estudo. O acesso a bibliotecas, laboratórios e outras instalações contribuiu significativamente para a qualidade da pesquisa realizada.

Agradeço também aos profissionais e especialistas que gentilmente compartilharam seus conhecimentos e experiências durante entrevistas, questionários ou qualquer outra forma de colaboração. Tais contribuições enriqueceram esta dissertação, fornecendo informações valiosas para a compreensão e análise do tema abordado.

Por fim, mas não menos importante, expresso minha gratidão aos meus familiares e entes queridos. O apoio incondicional, encorajamento e compreensão ao longo deste processo foram fundamentais para minha perseverança e dedicação. Suas palavras de incentivo e amor foram fundamentais para minha motivação.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento. Cada um desempenhou um papel importante na conclusão desta dissertação e em minha jornada acadêmica. Sou grata pela oportunidade de aprender e crescer por meio dessa experiência. Que esta dissertação possa contribuir para o conhecimento em sua respectiva área e inspirar outros pesquisadores a explorar e expandir os horizontes do conhecimento.

Mais uma vez, meu profundo agradecimento a todos vocês pela generosidade, pelo apoio e pelas contribuições ao longo desta jornada. Sou verdadeiramente grata por ter tido a oportunidade de trabalhar com pessoas tão incríveis e inspiradoras.

RESUMO

Bianchi, Naiara. *Avaliação de uma estação de referência para GNSS*. 74p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2024.

A busca incessante pela precisão do tempo é uma constante ao longo da história, e nos tempos modernos essa necessidade não se dissipa. O advento do Relógio Atômico, o ápice da precisão temporal, exemplifica essa busca incansável. Este instrumento, dotado de uma precisão sem precedentes, desempenha um papel crucial nos sistemas de GNSS (Global Navigation Satellite Systems), especialmente em termos de sincronização e precisão temporal, desempenhando fortemente essas características entre os dispositivos receptores e os satélites para fornecer informações de posicionamento confiáveis em todo o mundo. Neste estudo, o foco reside na compreensão de fatores que possam influenciar a localização da antena receptora de GNSS. Enquanto o Relógio Atômico proporciona uma base sólida de tempo e frequência, são os fatores externos, como temperaturas e umidade, que podem afetar a precisão da localização da antena. Assim, este trabalho busca investigar e compreender como esses fatores externos impactam a determinação da localização da antena receptora de GNSS, utilizando o Relógio Atômico como referência temporal confiável para esse processo.

Palavras-chave: GNSS. Relógio atômico. Precisão.

ABSTRACT

Bianchi, Naiara. Evaluation of a reference station for GNSS 74p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2024.

The incessant search for time precision is a constant throughout history, and in modern times this need does not dissipate. The advent of the Atomic Clock, the pinnacle of temporal precision, exemplifies this tireless quest. This instrument, equipped with unprecedented precision, plays a crucial role in GNSS (Global Navigation Satellite Systems) systems, especially in terms of synchronization and temporal precision, strongly playing these characteristics between receiving devices and satellites to provide positioning information. trusted around the world. However, in this study, the focus lies on understanding the factors that influence the location of the GNSS receiving antenna. While the Atomic Clock provides a solid foundation of time and frequency, it is external factors such as temperature, pressure and humidity that can affect the accuracy of the antenna's location. Therefore, this work seeks to investigate and understand how these external factors impact the precise determination of the location of the GNSS receiving antenna, using the Atomic Clock as a reliable temporal reference for this process.

Keywords: GNSS. Atomic clock. Precision.

Lista de Figuras

Figura 1 – Elementos que constituem um padrão de frequência, e também, um relógio atômico.....	15
Figura 2 – Ilustração dos conceitos de acurácia e estabilidade.....	17
Figura 3 – Quantidades utilizadas para calcular a variância de Allan.....	18
Figura 4 - Configuração simplificada do relógio da fonte atômica.....	21
Figura 5 – Relógio atômico na USP São Carlos.....	22
Figura 6 – Laboratórios de contribuição do TAI pelo mundo.....	24
Figura 7 – USP São Carlos.....	25
Figura 8 – Controle da hora no LRTE.....	26
Figura 9 – Relógio atômico do LRTE (1).....	27
Figura 10 – Relógio atômico do LRTE, por outro ângulo.....	27
Figura 11 – Tela de monitoramento da hora.....	28
Figura 12 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho (1).....	29
Figura 13 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho (2).....	29
Figura 14 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho, demonstrando movimentação do elemento césio.....	30
Figura 15 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (1).....	30
Figura 16 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (2).....	31
Figura 17 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (3).....	31
Figura 18 – Central de controle do relógio atômico da USP São Carlos.....	32
Figura 19 – Disponibilidade dos Produtos NRCan.....	33
Figura 20 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (1).....	36
Figura 21 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (2).....	37
Figura 22 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (3).....	37
Figura 23 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (4).....	37
Figura 24 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (5).....	38
Figura 25 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (1).....	38
Figura 26 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (2).....	39
Figura 27 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (3).....	39
Figura 28 – Dia Juliano Modificado.....	41
Figura 29 – Posicionamento da antena (1).....	42
Figura 30 – Posicionamento da antena (2).....	42

Figura 31 – Exemplo de arquivo de dados de posicionamento da antena gerados pelo relógio atômico do LRTE.....	43
Figura 32 – Gráfico de dispersão, com todos os pontos.....	44
Figura 33 – Gráfico de dispersão apresentando o ponto médio.....	45
Figura 34 – Posicionamento mais preciso da antena do relógio atômico (1).....	45
Figura 35 – Posicionamento mais preciso da antena do relógio atômico (2).....	46
Figura 36 – Exemplo de arquivo de dados meteorológicos gerados no LRTE.....	47
Figura 37 – Gráfico de variação meteorológica.....	48
Figura 38 – Gráfico de dispersão com coordenadas dos pontos extremos.....	49
Figura 39 – Gráfico de HE com os pontos extremos.....	49
Figura 40 – Gráfico de PR com os pontos extremos.....	50
Figura 41 – Gráfico de TE com os pontos extremos.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Características do relógio atômico.....	14
1.2 Relógio atômico de feixe de césio de alto desempenho.....	16
2 ASPECTOS GERAIS DE UM PADRÃO DE FREQUÊNCIA.....	18
2.1 Caracterização de um oscilador.....	19
2.2 Acurácia.....	20
2.3 Estabilidade.....	21
2.4 Princípios de Operação de um Padrão de Frequência Atômico.....	22
2.4.1 Avaliação de um Padrão de Frequência Atômico.....	22
2.5 Fonte atômica.....	24
3 RELÓGIO ATÔMICO DO LABORATÓRIO LRTE – SÃO CARLOS (SP).....	27
4 PROCESSAMENTOS DOS DADOS DE LOCALIZAÇÃO DA ANTENA DO RELÓGIO ATÔMICO DO LRTE.....	39
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	58
<i>Apêndice 1.....</i>	<i>60</i>
<i>Apêndice 2.....</i>	<i>66</i>
<i>Apêndice 3.....</i>	<i>67</i>
<i>Apêndice 4.....</i>	<i>70</i>

1 INTRODUÇÃO

Para Magalhães (2004), a busca pela precisão do tempo sempre foi uma necessidade, e não é diferente nos tempos modernos. A corrida por uma referência de tempo mais precisa está cada vez mais acirrada, para cada novo desafio de limite de estabilidade sempre parece surgir algum tipo de solução. Antigamente, tivemos o primeiro relógio de J. Harrison para as embarcações, mas foi só em 1960 que o mundo conheceu a definição de uma escala de tempo mais precisa, o segundo. O segundo relógio, naquele ano, foi definido como a fração $1/31.556.925,9747$ do ano tropical de 1900, dados que foram conseguidos por meio de observações astronômicas com a determinação da variação do ano solar. Tempos depois, houve a redefinição do segundo relógio para que houvesse uma maior precisão nos sistemas de navegação e rádio. Contudo, a frequência de cristal de quartzo que utilizavam até então para assegurar a confiabilidade na coleta de dados, mesmo sendo de alta performance, acabou sofrendo um deslocamento com o decorrer do tempo. Assim, apesar do uso de um algoritmo de correção preditivo, essa incerteza na determinação era um fator extremamente limitante.

Bebechibuli (2007) também afirma que a metrologia científica, com o decorrer dos anos, se mostrou de extrema necessidade na sociedade contemporânea, tornando a capacidade de medir com precisão, o tempo, um fator determinante para o desenvolvimento das áreas industriais, de telecomunicações, aviação e informática. O Brasil, um país em constante desenvolvimento, cada vez mais está pensando essa área com seriedade e maturidade, mas, para concretização desse campo, se faz necessário um conjunto de esforços para o desenvolvimento de tecnologias e de pesquisas sobre o assunto. Partindo desse princípio, a dissertação tem como principal intuito desenvolver os estudos sobre o relógio atômico.

De acordo com o autor citado acima, no decorrer do tempo foram utilizados diversos tipos de instrumentos para medir a passagem do tempo. Um grande marco para o desenvolvimento dos relógios como conhecemos hoje aconteceu no ano de 1714, a imprecisão dos instrumentos de medida da época para verificar as posições de navios nos mares, ocasionou um acidente marítimo gravíssimo. A navegação a partir daí se tornou um dos maiores estímulos para a busca de relógios que medissem o tempo com mais precisão, uma vez que até então apenas utilizavam a posição do Sol e das estrelas no céu.

Na atualidade, a navegação ainda continua sendo um dos principais usos desses instrumentos de medidas, porém, não é mais a única a se beneficiar de sua aplicabilidade. Os relógios e osciladores de precisão são de suma importância em diversas áreas da ciência e tecnologia, eles são utilizados nos testes da relatividade geral, na sincronização dos sistemas de comunicação digital e também para determinar unidades fundamentais, como o metro e o volt. (TAVELLA, 1991)

Um avanço foi alcançado no início de 1980, quando William Phillips desenvolveu novos métodos de desaceleração de um feixe de átomos rápidos. Em 1985, os primeiros relatórios vieram de experimentos em que a velocidade média foi reduzida de 1000 m/s para zero. O próximo avanço veio no mesmo ano, quando Steven Chu resfriou átomos em três dimensões, usando o resfriamento Doppler com três pares de feixes de laser de contrapropagação. Nessa configuração, um átomo, independentemente da direção em que esteja se movendo, encontrará uma força de atrito. Desta forma, a propagação da velocidade (e a temperatura) será reduzida. A ação da luz do laser sobre os átomos é como a de um meio pegajoso, dando origem ao termo melação óptica. (SHANG, 2020)

Para Shang (2020), os relógios atômicos possuem uma função crucial em pesquisas e aplicações no dia a dia, sendo essenciais não só em campos convencionais, como navegação, calibração e comunicações, mas também na área de medição de precisão, como, por exemplo, na detecção de ondas gravitacionais e geodésias. Com isso, a melhoria do desempenho do relógio representa um significativo avanço tecnológico atualmente, pois os relógios ópticos são mais eficazes em relação aos relógios de micro-ondas; contudo, eles ainda possuem seus empecilhos, pois ainda é desafiador trabalhar com eles fora dos laboratórios. Isso ocorre, principalmente, devido ao seu sistema complexo e elevado tamanho, embora existam pesquisas que envolvam a realização de um optical lattice (o tamanho total ainda é de 15 m^3) ou um sistema de feixe térmico miniaturizado (tamanho total é de 1 m^3), para conseguir atender a outros requisitos de aplicação. Entre todos os relógios atômicos, os relógios de césio possuem um destaque especial, porque o segundo SI (Sistema Internacional de Unidades) é definido na transição quântica hiperfina de micro-ondas do estado fundamental do césio.

Para Bebechibuli (2007), a função principal de um bom relógio é a de fornecer um sinal constante e periódico ao longo do tempo. A frequência em um determinado evento arbitrário, como, por exemplo, a oscilação quântica de um pêndulo atômico, pode

ser utilizada para definir a unidade básica do tempo, que é o segundo. Para compor o átomo a um oscilador, imagine um átomo com dois níveis de energia: E_1 e E_2 , em que $E_2 > E_1$; por meio dos estudos de Bohr, no século XX, descobriu-se que os níveis de energia de um átomo são quantizados e a diferença de energia que divide seus níveis é dada pela relação do Bohr: $h\nu_0 = E_2 - E_1$. Essa relação nos diz que no momento em que um sistema sofre uma radiação eletromagnética, este campo interage com a distribuição de carga do próprio sistema, de maneira a gerar uma transição entre os estados atômicos. No momento em que a frequência de radiação for exatamente a mesma que a frequência de Bohr, a probabilidade de acontecer esta transição é máxima. A relação entre a frequência e a energia, associada ao fato de os átomos emitirem/absorverem certas energias, é um acontecimento bem importante para os relojoeiros, porque esses átomos podem ser usados como osciladores de referência, e a frequência de ressonância, emitida ou absorvida, é uma característica intrínseca do átomo. Essa propriedade, portanto, confere ao oscilador atômico uma magnífica reprodutibilidade, como também, uma exatidão jamais obtida por qualquer outro oscilador macroscópico.

Para Wynands (2005), um dos principais objetivos das últimas décadas foi com certeza o aperfeiçoamento do relógio atômico de césio, buscando por tempos de interação cada vez maiores dos átomos com a radiação de micro-ondas. Resultados incríveis foram obtidos pelo uso de uma combinação de zonas de Ramsey amplamente separadas e a seleção magnética de átomos lentos. Contudo, as colisões intra-feixe e a distribuição de velocidade em um feixe atômico térmico atrapalham a seleção de átomos muito mais lentos do que 70 ms^{-1} , enquanto as restrições geométricas e a influência crescente da forma exata da distribuição de velocidade em potenciais deslocamentos sistemáticos de frequência colocam um limite superior na separação útil da zona de Ramsey. Para velocidades atômicas típicas de 100 m s^{-1} e uma separação de zonas de 1 m , tem-se um tempo de interação de 10 ms ou uma largura de linha de ressonância de 50 Hz . Esta linha tem que ser resolvida com uma relação sinal-ruído (S/N) da ordem de 10^6 para obter as incertezas dos relógios de feixe térmico de bombeamento óptico de hoje.

1.1 Características do relógio atômico

De acordo com Muller (2010), com o avanço da sociedade moderna cresceu cada vez mais a necessidade de novas tecnologias, pois os dispositivos que fazem parte do dia a dia, como os celulares, computadores e eletrodomésticos. Semelhantemente, a área de

metrologia de tempo e frequência sofreu um fenômeno parecido, pois dispositivos que alguns anos atrás pareciam adequados, atualmente necessitam de uma maior precisão, como é o caso do Sistema de posicionamento global (GPS), da navegação no espaço, e da radiotelescopia. Atualmente, os relógios de Cs tipo “fountain” (chafariz de átomos) medem o segundo com grande precisão, em um nível de uma parte em 10^{16} . Existem duas principais quantidades que caracterizam esse desempenho de um relógio atômico, são elas: a acurácia e a precisão. A acurácia é determinada pelo quanto é correta a frequência medida, a qual corresponde a frequência estabelecida para a transição. Na maioria das vezes, a acurácia depende do átomo utilizado e do quanto ela isolar esses átomos do meio durante a espectroscopia. Já a precisão de um relógio se refere à estabilidade (ou instabilidade), que representa a reprodutibilidade da frequência medida em um certo tempo. A estabilidade é inversamente proporcional ao fator de qualidade Q de uma transição atômica e à relação sinal-ruído S/R da medida. Portanto, concluímos que quanto maior for Q e S/R , maior será a precisão do relógio. Os chamados Relógios de Cs obedecem a esse critério, pois a transição relógio de 9,2 GHz (relógio de micro-ondas) pode ser vista com uma largura de 0,5 Hz, resultando num $Q > 10^{10}$.

O sistema GPS, atualmente, possui uma importância tecnológica gigantesca e é um ótimo exemplo do valor dos relógios atômicos na sociedade contemporânea. Cada satélite do sistema GPS usa no mínimo um relógio atômico a bordo para transmitir sinais extremamente sincronizados e codificados, permitindo o posicionamento exato de receptores no solo, tudo isso com um nível incrível de exatidão de cerca de 1 mm para objetos parados. Com essa habilidade excelente de posicionamento do GPS, houve uma revolução na navegação com aviões, navios e até mesmo os veículos pessoais acabaram usufruindo desse recurso, podendo confiar no sistema para realizar um determinado trajeto de forma mais segura e eficiente possível. Esse sistema também permitiu o avanço tecnológico na agrimensura e cartografia, além de várias outras aplicações no nosso cotidiano. A informação exata de sincronismo é utilizada até hoje para sincronizar redes de computadores para bancos e internet, operações em redes de telefonia móvel e até mesmo em gerenciamento de redes de energia em grande escala. Com o avanço científico e tecnológico resultante do desenvolvimento de relógios atômicos extremamente precisos, é compreensível que diversos centros de pesquisas e pesquisadores desenvolvam arduamente trabalhos para aumentar ainda mais os limites de precisão desses relógios. (MULLER, 2010)

Sendo assim, essa dissertação tem por principal objetivo avaliar com maior exatidão e precisão possível o posicionamento de uma antena receptora de GNSS com o auxílio do relógio atômico, como também demonstrar como fatores externos e o clima podem interferir diretamente com esses dados

1.2 Relógio atômico de feixe de césio de alto desempenho

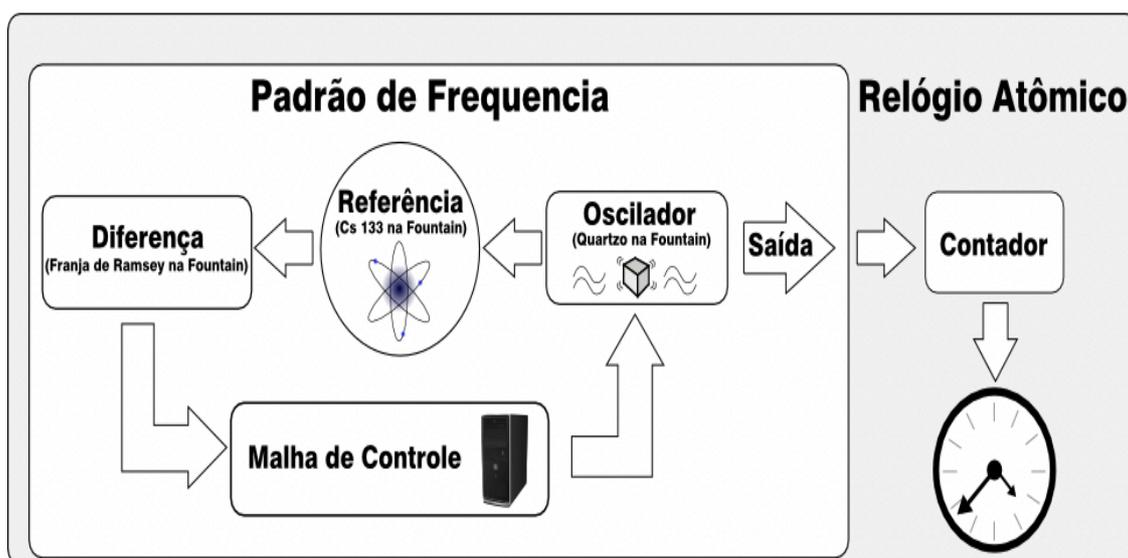
Na contemporaneidade, os laboratórios possuem relógios comerciais de césio, esses relógios são individualmente capazes de realizar uma escala de tempo estável, podendo também serem comparados com os padrões de frequência primários e, portanto, corrigidos para precisão. Entretanto, os dispositivos físicos tendem a falhar, por isso, esses laboratórios são inevitavelmente levados a manter não só um, mas vários relógios que são tratados como um conjunto. As leituras desses relógios podem ser combinadas através de um algoritmo projetado especificamente para aumentar a estabilidade, precisão e confiabilidade da escala de tempo acima do nível de desempenho que poderia ser feito por qualquer relógio individual no conjunto. No projeto de algoritmos de escala de tempo, não se tem uma melhor solução geral, pelo contrário, um bom design representa uma série de escolhas apropriadas ao propósito para o qual a escala de tempo deve ser usada. É muito improvável que um algoritmo desenvolvido para fornecer um padrão de referência temporal satisfaça os requisitos daqueles cujo interesse é a prestação de um serviço para pesquisa. Uma escolha primordial no projeto de um algoritmo é se ele deve fornecer sua escala de tempo em tempo real, ou próximo a ela, ou se uma escala atrasada é aceitável. (WIEMAN, 1991)

Para os estudos científicos, na maioria das vezes se faz necessário produzir a escala de tempo em tempo real após cada medição. Um exemplo típico é a escala de tempo AT1, calculada no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia: a escala AT1 é obtida a partir de um conjunto de cerca de 10 relógios, localizados em um local comum com acesso fácil e frequente às medições. O algoritmo AT1 (NIST) estima tempo, peso adaptativo e frequência para cada relógio de contribuição em cada ciclo de medição (a cada duas horas). Para uma referência internacional como, por exemplo, TA1 (temps atomique international), o requisito é de extrema confiabilidade e estabilidade a longo prazo. Para suprir esse propósito, o TA1 conta com um grande número de relógios de diferentes tipos, localizados em diferentes partes do mundo e conectados em uma rede que permite a troca precisa de dados de tempo. (TRAVELLA, 1991)

2 ASPECTOS GERAIS DE UM PADRÃO DE FREQUÊNCIA

O termo Padrão de Frequência é compreendido como um oscilador extremamente preciso realimentado por uma malha de controle que usa uma referência atômica. Um oscilador irá gerar um sinal elétrico que é submetido à comparação com uma transição atômica, gerando um sinal de erro produzido pela diferença entre o oscilador e a referência. Este, por sua vez, realimenta o oscilador fechando a malha de controle, a saída do oscilador é o sinal do padrão de frequência para as aplicações. Esta é uma descrição simplificada de uma malha de controle que trava o padrão de frequência na transição atômica dele, e para obter um relógio atômico, basta colocar um contador na saída do oscilador e usar um dispositivo para mostrar essa contagem, como pode ser exemplificado na figura abaixo. (ALVES, 2012)

Figura 1 – Elementos que constituem um padrão de frequência, e também, um relógio atômico.



Fonte: Alves (2012)

De acordo com o autor, geralmente nos padrões de microondas o sinal é gerado por um oscilador de alta precisão, este sinal excita um modo eletromagnético em uma cavidade de micro-ondas e os átomos passam por essa cavidade, onde sofrerão uma transição de estado. O ponto ótimo do padrão de frequência é quando acontece o máximo de transição na amostra atômica. Os desvios do ponto máximo da curva são usados como sinal de realimentação da malha de controle, alterando a frequência do oscilador, de forma que ela esteja sempre próxima do máximo da curva. Desta maneira, tem-se o travamento do oscilador na transição atômica de referência.

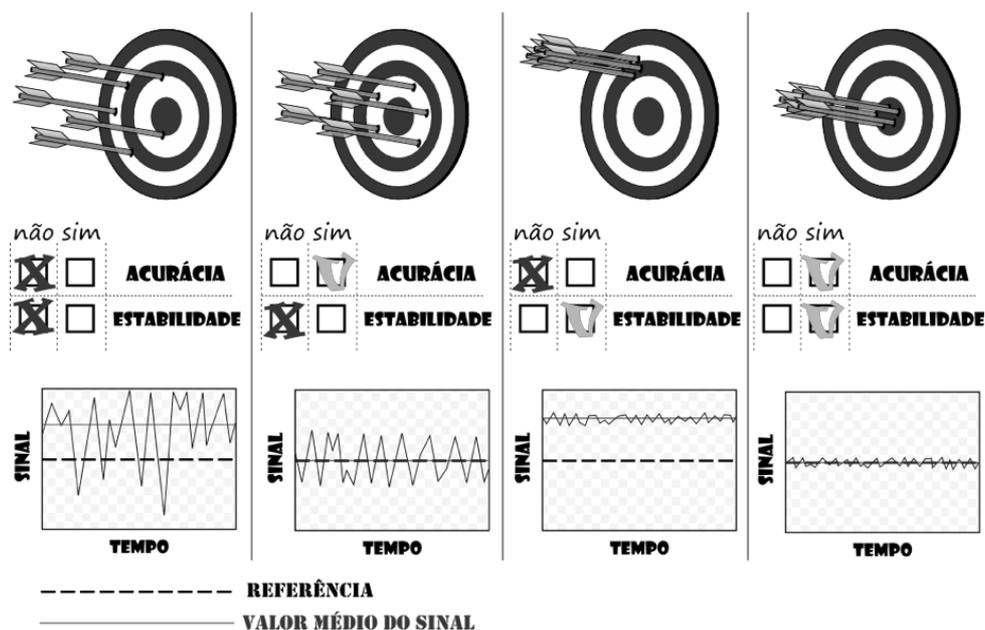
2.1 Caracterização de um oscilador

Segundo Alves (2012), os parâmetros geralmente usados para caracterizar um oscilador são a acurácia e a precisão (estabilidade). Para melhor entendimento desses parâmetros, podemos usar de uma analogia: imagine um arqueiro em um estande de tiro, ele prepara seu arco e dispara 4 flechas em direção ao alvo, mirando no seu centro:

- Se acontecer de todas essas flechas acertarem exatamente o centro do alvo pode-se dizer que os disparos foram acurados e precisos;
- Se as flechas ficarem espalhadas pelo alvo, mas ficarem em torno do centro, então pode-se dizer que, em média, os disparos foram acurados, mas não conseguiram ser precisos;
- Mas, se todas essas flechas ficarem muito próximas umas das outras, mas deslocadas em relação ao centro do alvo, pode-se dizer que os disparos foram precisos, mas não tiveram acurácia;
- E, por último, se o arqueiro não conseguir colocar as flechas próximas e também distantes do centro do alvo, então pode-se dizer que os disparos não foram precisos e nem tiveram acurácia.

O mesmo ocorre com um sinal elétrico que varia em relação ao tempo: o sinal do oscilador será avaliado com relação à sua frequência de oscilação. Portanto, todas as possíveis variações em torno do valor central de frequência levam à determinação da acurácia e da estabilidade deste oscilador, como pode ser visualizado na figura abaixo. (ALVES, 2012)

Figura 2 – Ilustração dos conceitos de acurácia e estabilidade.



Fonte: Alves (2012)

Voltando para a analogia com um arqueiro, segundo o autor, pode-se procurar saber os motivos da falta de estabilidade e acurácia:

- Se por um acaso, o atirador estivesse fraco e tremendo, isto poderia explicar muito o fato dos disparos terem sido dispersos.
- Se por um acaso, a mira do arco que foi usado não estivesse calibrada de maneira correta, essa poderia ser a explicação para a falta de acurácia.

Da mesma maneira, pode-se examinar os motivos que levam à falta de acurácia e estabilidade em um padrão de frequência. Normalmente os problemas de estabilidade se relacionam com o sistema que está interrogando os átomos, e a acurácia está relacionada com o quão bem conseguimos isolar ou corrigir as perturbações do meio na transição atômica de referência. (ALVES, 2012)

2.2 Acurácia

De acordo com Alves (2012), a acurácia é definida como a incerteza no desvio entre o valor médio de frequência medido pelo sistema e o valor ideal. Podemos analisar este problema através da equação abaixo.

$$\nu = \nu_0 [1 + \varepsilon + y(t)]$$

Nela, o termo (ε) representa o erro sistemático entre a frequência observada e a frequência ideal. Tal deslocamento de frequência tem vários componentes causados por fenômenos físicos, como colisões atômicas, radiação de corpo-negro, entre outros. Pode-se, assim, avaliar cada um desses desvios com um certo grau de certeza, os quais resultam em incertezas associadas aos efeitos ditos sistemáticos. (ALVES, 2012)

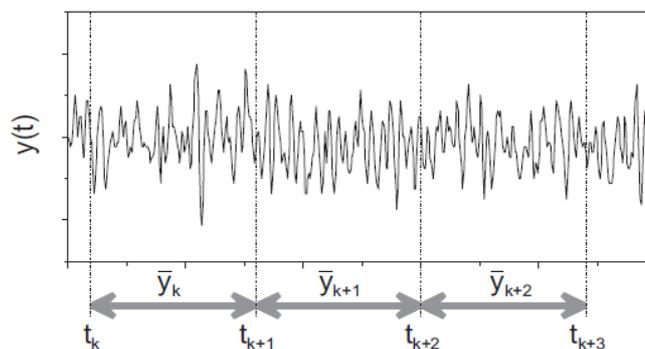
2.3 Estabilidade

Segundo Alves (2012), a estabilidade do padrão atômico possui flutuações de frequência, dependentes do tempo, em torno do seu valor médio. Os limites de estabilidade de um padrão de frequência são verificados por flutuações de natureza totalmente aleatória ou sistemática, sendo associadas aos deslocamentos de frequência.

Em osciladores reais não só a frequência, mas também a amplitude do sinal flutua. O principal problema é que eles fazem isso de uma forma bem menos comportada. Vários fenômenos físicos, incontroláveis, geram flutuações de fase e amplitude de forma irregular, mesmo nos mais avançados osciladores. As principais fontes de ruído no chafariz atômico são: ruído da cadeia de microondas, ruído no sistema de detecção e os ruídos quânticos (ruído de projeção quântica e *atomic shot noise*). (ALVES, 2012)

A maneira mais usada para se calcular e avaliar a estabilidade de um padrão atômico é por meio da variância de Allan (apresentada na figura abaixo). Com a utilização da variância de Allan podemos discriminar vários tipos diferentes de ruídos estatísticos no sinal do padrão de frequência, ajudando no diagnóstico de possíveis limitantes à estabilidade do sistema.

Figura 3 – Quantidades utilizadas para calcular a variância de Allan.



Fonte: Alves (2012)

2.4 Princípios de Operação de um Padrão de Frequência Atômico

Segundo Torres (2007), os padrões de frequências atômicos usam a frequência de transição natural entre dois níveis de energia de um átomo, estes níveis, por sua vez, quando excitados de maneira correta podem gerar um sinal de saída periódica no decorrer do tempo. Para que se consiga gerar este sinal de saída podemos usar dispositivos de medidas passivos ou ativos. Os ativos têm como base a amplificação da radiação eletromagnética por emissão estimulada da frequência natural atômica proposta por Albert Einstein em 1917. Já os padrões passivos, o meio atômico discrimina a frequência do oscilador local por meio da medida da taxa de probabilidade de transição entre dois níveis atômicos.

2.4.1 Avaliação de um Padrão de Frequência Atômico

De acordo com Bebeachibuli (2007), foi definido tendo como base a transição hiperfina entre os dois níveis do estado fundamental dos átomos de ^{133}Cs , quando esses encontram-se em repouso, isolados e no espaço livre. Essas condições não podem ser atendidas em um padrão de frequência atômico real, em que ocorre a reprodução do segundo. Essa frequência, por sua vez, é deslocada por uma quantidade ϵ e ela é caracterizada pela soma dos ϵ_i de cada um dos efeitos que deslocam a transição relógio. Em cada efeito há uma incerteza associada à sua medida. Os principais efeitos sistemáticos que deslocam a frequência de transição relógio medida por um padrão de frequência atômico são:

1. Efeito Zeeman de Segunda ordem – é induzido por meio de um campo magnético estático conhecido por C-field, este possui a função de levantar a degenerescência dos níveis hiperfinos do estado fundamental e definir o eixo de quantização atômico de maneira a privilegiar a transição relógio. A dependência da transição relógio com o campo magnético estático e a incerteza de sua frequência é verificada tendo como base os dados experimentais da intensidade média do campo magnético estático, sua não homogeneidade e sua estabilidade temporal.
2. Radiação de Corpo Negro – No decorrer do voo balístico, os átomos experimentam uma radiação em equilíbrio térmico com a temperatura T da região de interrogação e o sistema de vácuo. Esta radiação dá origem a uma densidade espectral de potência equivalente à radiação de corpo negro e induz um

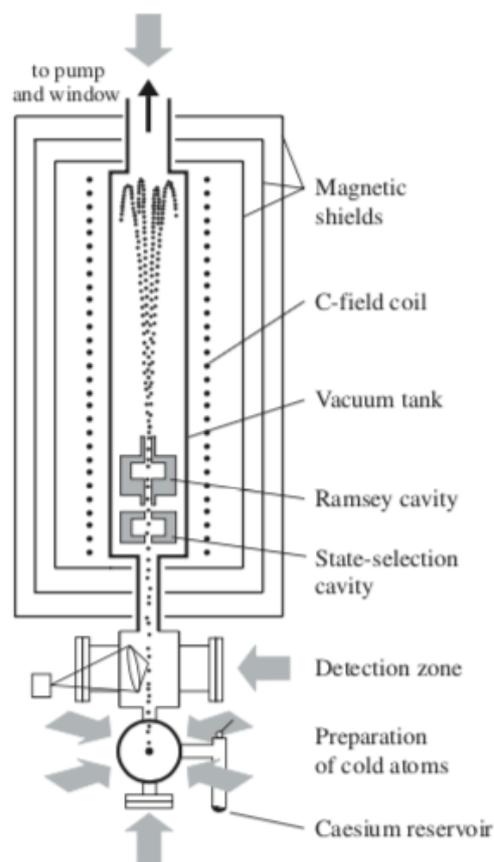
deslocamento de frequência devido aos efeitos Stark e Zeeman AC não ressonantes.

3. Efeito Colisional – O deslocamento de frequência colisional é devido a colisão entre os átomos de ^{133}Cs na nuvem e com os átomos do vapor de fundo. Ela possui uma dependência linear com a densidade média dos átomos na nuvem entre as duas regiões de interação.
4. Efeito Gravitacional – Esse efeito ocorre devido à variação da energia potencial gravitacional terrestre para diferentes altitudes, as quais os padrões de frequências atômicos encontram-se.
5. Rabi Pulling – Este é um efeito causado devido à superposição dos pedestais entre transições adjacentes ao pedestal da transição relógio, decorrentes da presença de uma assimetria e da existência de uma população diferente de zero nos subníveis.
6. Efeito Doppler de primeira ordem – Esse efeito é derivado do gradiente de fase do campo sentido dentro da cavidade e ao longo da região de voo livre pelos átomos durante a sua trajetória.
7. Cavity Pulling – quando a cavidade de micro-ondas não se encontra exatamente sintonizada na frequência de transição atômica, a amplitude do campo varia assimetricamente ao ter a frequência modulada através da frequência de transição atômica, o que produzirá um deslocamento de frequência na transição relógio. Este deslocamento pode ser combinado com a interferência entre o campo irradiado pela antena da cavidade e o campo emitido pelo dipolo magnético quando os átomos passam pela cavidade.
8. Deslocamento Luminoso – A incidência de luz laser durante a interação dos átomos com a micro-onda pode causar um deslocamento na frequência de transição relógio. Devido ao caráter pulsado do relógio tipo chafariz, durante a passagem dos átomos pela cavidade, a luz do laser está desligada e, portanto, esse efeito é minimizado.
9. Fuga de micro-ondas – Se ocorrer qualquer acoplamento da perturbação oscilatória com os átomos na região de voo livre, a frequência da transição relógio será deslocada.

2.5 Fonte atômica

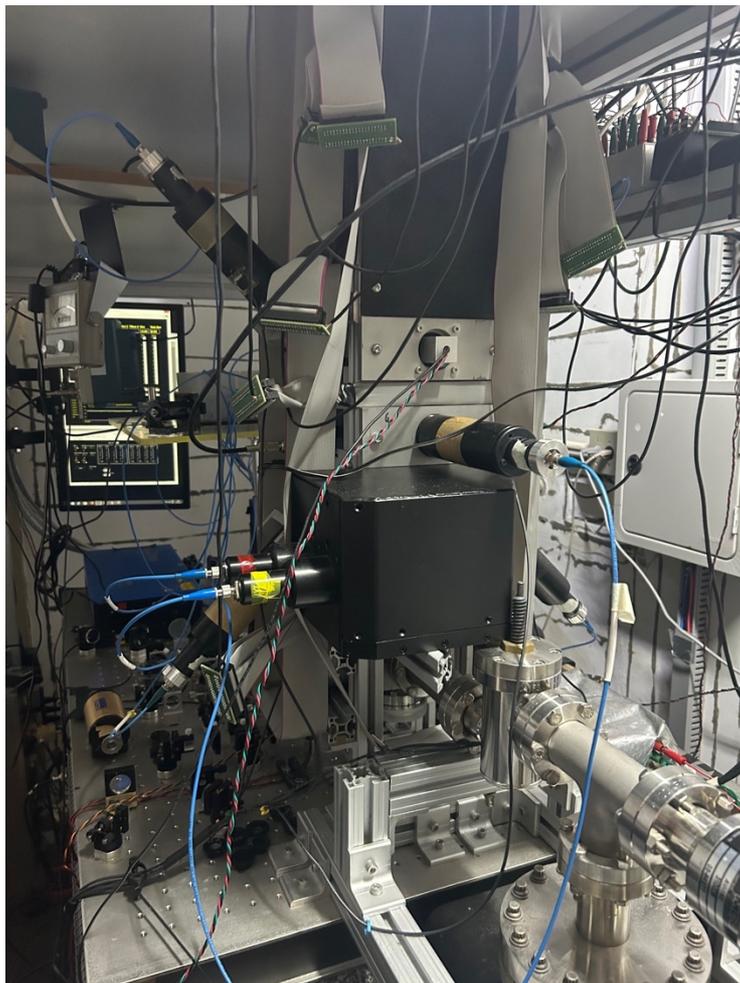
As figuras abaixo mostram uma configuração simplificada do subsistema de vácuo de um relógio-fonte. Seis feixes de laser se cruzam no centro da zona de preparação, onde a nuvem atômica fria é gerada. A zona de detecção é penetrada por feixes de laser para detecção de fluorescência da nuvem descendente. Na presença de um campo magnético longitudinal interno bem definido, as interações de micro-ondas ocorrem dentro de um escudo magnético. (WYNANDS, 2005)

Figura 4 - Configuração simplificada do relógio da fonte atômica



Fonte: Wynands (2005)

Figura 5 – Relógio atômico na USP São Carlos



Fonte: Autores (2023)

Para Wynands (2005), a principal conquista científica que permitiu a operação de uma fonte atômica foi o resfriamento a laser. Uma revisão histórica do desenvolvimento desta técnica é apresentada nas palestras do Nobel de 1997. Em primeiro lugar, é necessária uma fonte de átomos de césio. Tradicionalmente consiste em um reservatório de césio com temperatura controlada, separado da câmara de resfriamento por uma válvula. O reservatório é mantido a uma temperatura adequada próxima à temperatura ambiente para obter uma pressão parcial de césio da ordem de 10^{-6} Pa na câmara de resfriamento. Para obter as baixas temperaturas exigidas das amostras de átomos em uma fonte atômica, os átomos são resfriados em uma armadilha magneto-óptica (MOT) e/ou melaço óptico (OM). Comum a ambas as configurações é uma configuração que consiste em três pares mutuamente ortogonais de feixes de laser, que são bem balanceados em relação às suas intensidades e geralmente têm diâmetros de cerca de dois centímetros.

Duas geometrias diferentes de feixe de laser são usadas: o primeiro usa dois feixes verticais, direcionados para cima e para baixo (eixo z) e quatro feixes horizontais ao longo do eixo x e do eixo y de um sistema de coordenadas cartesianas, respectivamente. Esta configuração oferece a vantagem de fácil alinhamento, mas tem a desvantagem de um par de feixes de laser se sobrepor às trajetórias atômicas. Estes dois feixes de laser são limitados em diâmetro pelas aberturas (normalmente de 1 cm de diâmetro) da cavidade de micro-ondas e são particularmente críticos em conexão com o deslocamento da luz laser, ou seja, uma interação descontrolada de mudança de frequência com os átomos durante seu vôo balístico. Estas desvantagens são contornadas pela chamada configuração do feixe de laser, consistindo novamente em três pares ortogonais de feixes de laser, mas com um arranjo espacial diferente: quando na configuração descrita anteriormente o laser imagina-se que vigas percorrem as seis normais da face de um cubo situado em uma de suas faces; na configuração, esse cubo está equilibrado em um de seus cantos. Três feixes de laser (dispostos simetricamente em torno do eixo vertical) estão, portanto, apontando para baixo em um ângulo de $54,7^\circ$ em relação à vertical e, conseqüentemente, três feixes de laser estão apontando para cima.

A configuração óptica desempenha um papel crucial na manipulação precisa da luz laser, fornecendo os meios necessários para ajustar com extrema precisão tanto a potência quanto a frequência. Esses ajustes são essenciais para uma variedade de aplicações, desde o resfriamento e lançamento de átomos até a detecção adequada de seus estados quânticos. Além disso, durante a interação dos átomos com o campo de micro-ondas, é imperativo que toda a luz do laser seja completamente bloqueada. Esse bloqueio é vital para garantir a estabilidade da frequência de transição de micro-ondas, prevenindo qualquer distorção indesejada devido ao efeito AC Stark, que poderia comprometer os resultados experimentais. (WYNANDS, 2005)

Por todas essas razões, é comum encontrar configurações ópticas que empregam exclusivamente sistemas de diodo laser. Essa escolha é motivada por uma série de vantagens, incluindo tamanho compacto, baixo consumo de energia, confiabilidade e facilidade de uso. Os diodos laser oferecem uma solução eficaz e conveniente para alcançar resultados consistentes e precisos em uma ampla gama de contextos experimentais e aplicações práticas. (WYNANDS, 2005)

São Carlos se tornou referência quando o assunto é tecnologia, grande parte se deve ao fato de abrigar grandes universidades de renome nacional e internacional. O Instituto de Física de São Carlos (IFSC/USP), em conjunto com a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), saem na frente quando o assunto é metrologia, pois eles possuem um dos únicos relógios atômicos construídos no Brasil. (CHICRALA, 20219)

Figura 7 – USP São Carlos



Fonte: Naoe (2019)

Com o uso do relógio de alta precisão, a USP São Carlos consegue medir cada segundo com extrema exatidão. Isso não apenas impulsiona o desenvolvimento contínuo de sistemas de navegação eficientes e altamente precisos, mas também oferece suporte às redes de telecomunicações e computação devido ao seu nível excepcional de precisão. (CHICRALA, 20219)

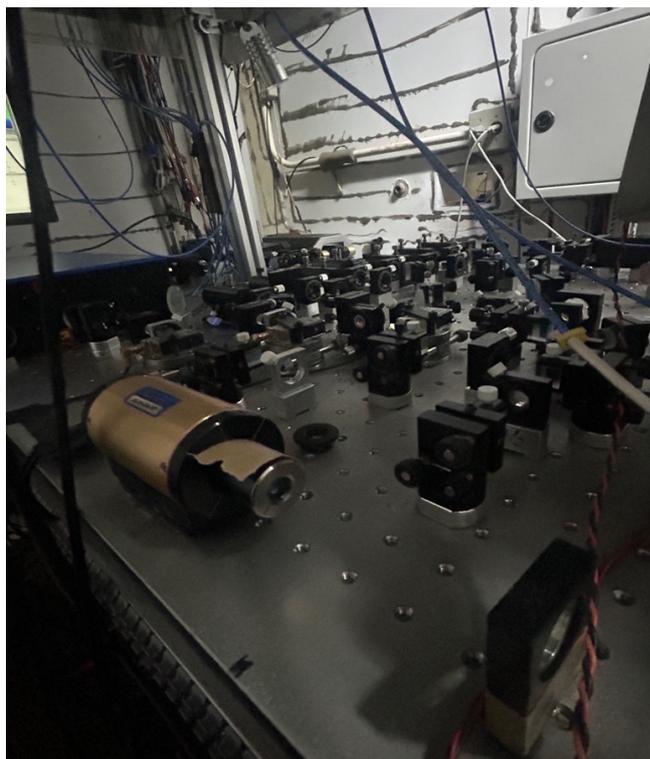
Figura 8 – Controle da hora no LRTE



Fonte: Autores (2023)

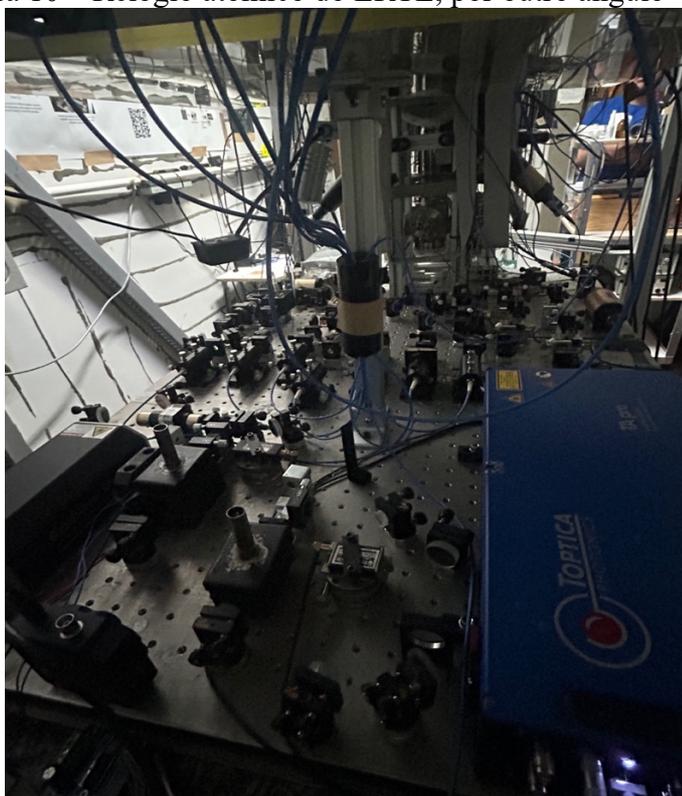
De acordo com Chicrala (2019), ao redor do mundo existem diversos laboratórios que auxiliam no controle do tempo internacional, fazendo contribuições diárias a instituição francesa BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), a qual gerencia e coordena esse conjunto de laboratórios. O Laboratório de Tempo e Frequência, sob a gestão do IFSC/USP e da EESC/USP, agora também possui seu lugar garantido neste seletivo grupo de infraestruturas que cooperam com a definição do tempo internacional, dando à USP São Carlos um gigantesco reconhecimento nacional e internacional, enaltecendo cada vez mais a gigantesca qualidade e modernização de seus laboratórios.

Figura 9 – Relógio atômico do LRTE (1)



Fonte: Autores (2023)

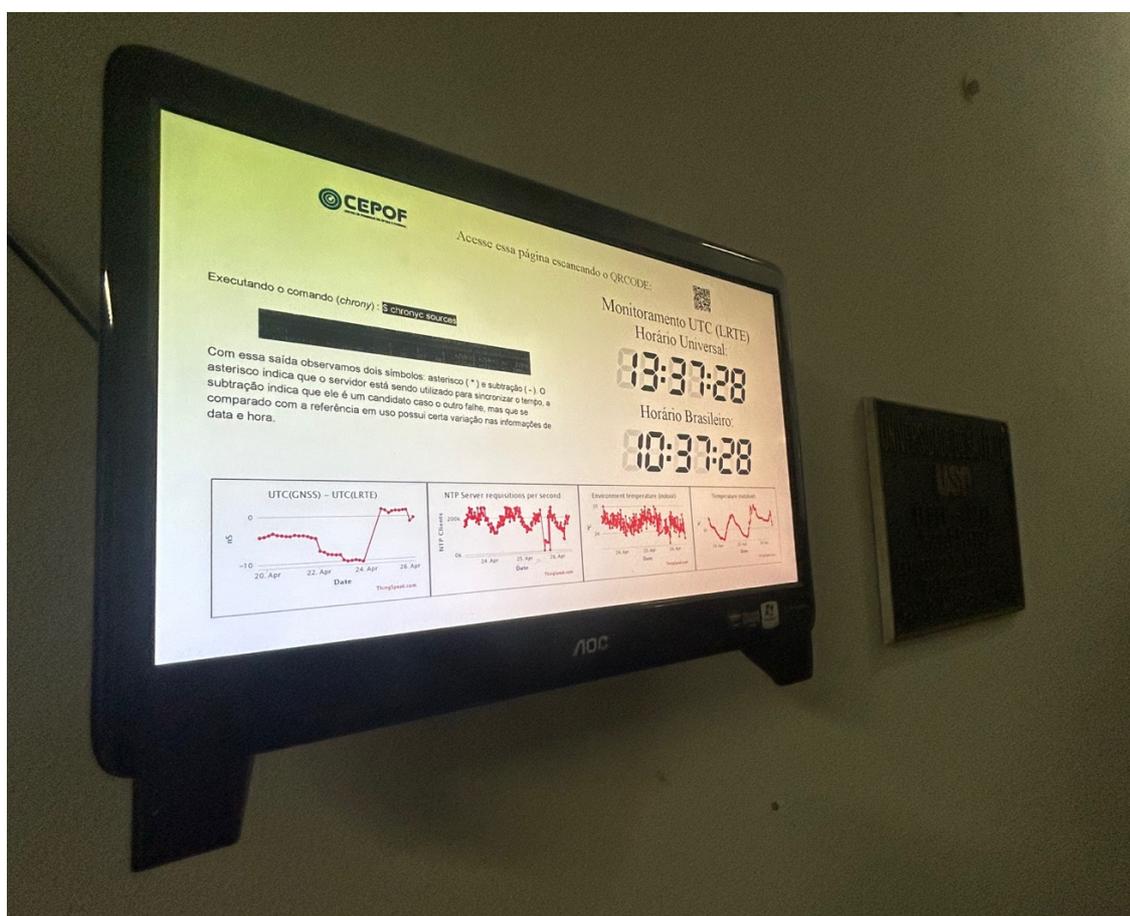
Figura 10 – Relógio atômico do LRTE, por outro ângulo



Fonte: Autores (2023)

Segundo Naoe (2019) o relógio atômico comercial, apesar de ser disponibilizado para qualquer pessoa, possui um diferencial na USP São Carlos, uma vez que existe o envio dos dados para o BIPM. Esses dados devem ser coletados em diversos laboratórios credenciados e especializados ao redor de todo o planeta, pois ao contrário do que muitos pensam, os relógios atômicos não estão imunes a interferências, sejam elas a partir do próprio clima ou até mesmo de movimentação tectônica, por isso, há a necessidade da cooperação entre diversos países para diminuir cada vez mais a margem de erro.

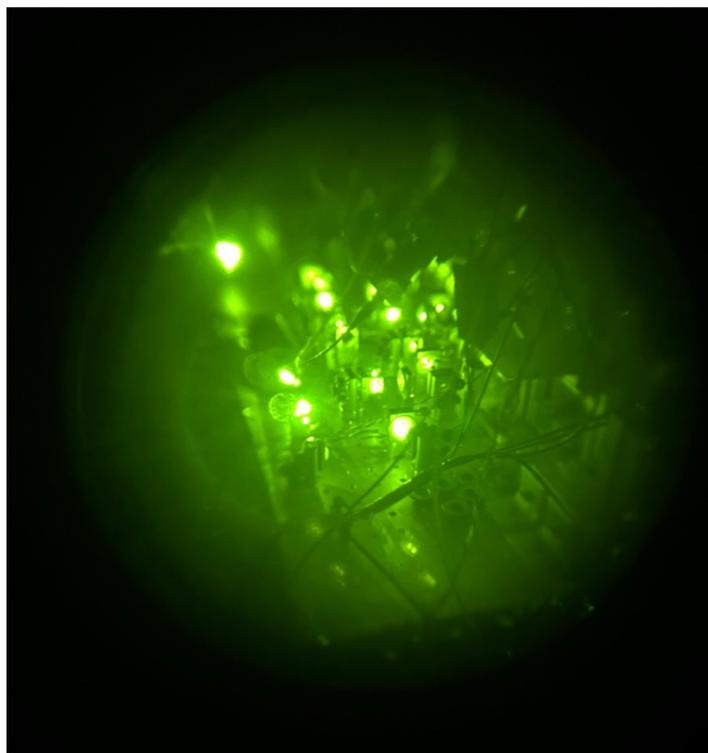
Figura 11 – Tela de monitoramento da hora



Fonte: Autores (2023)

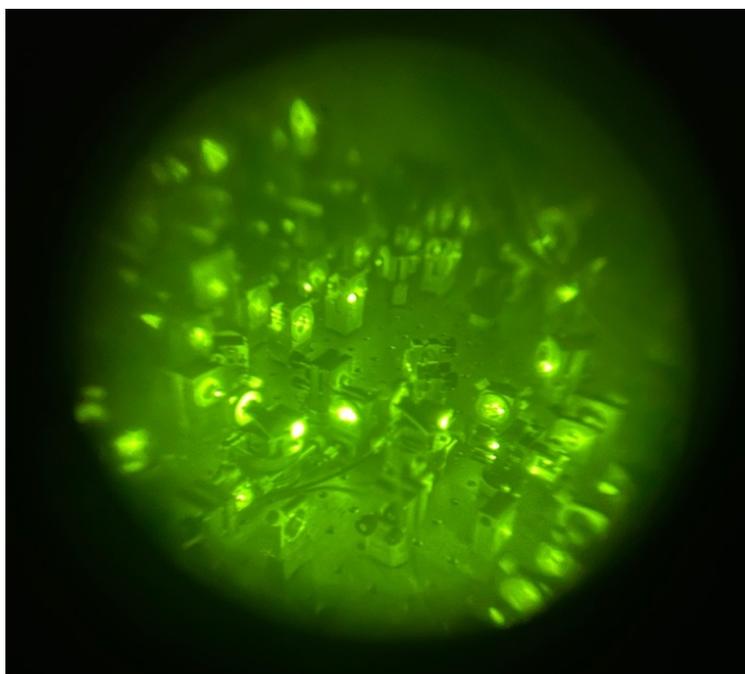
A USP tem contribuído muito para desenvolver mais pesquisas na área e também para diminuir a margem de erro existente. Essa dissertação tem o intuito de elencar e expor as principais interferências que a antena do LRTE tem sofrido no decorrer dos anos e como se tem lidado com tais complicações. (NAOE, 2019)

Figura 12 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho (1)



Fonte: Autores (2023)

Figura 13 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho (2)



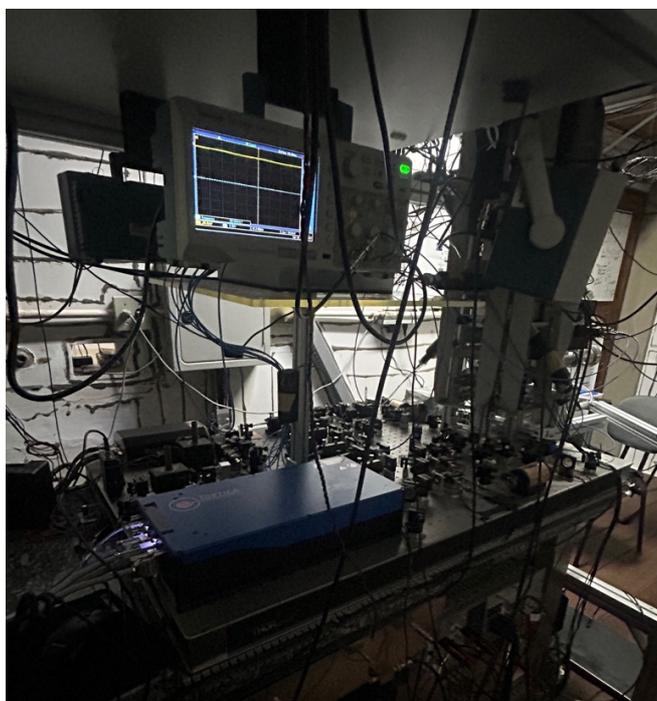
Fonte: Autores (2023)

Figura 14 – Relógio atômico do LRTE através de câmera de infravermelho, demonstrando movimentação do elemento césio



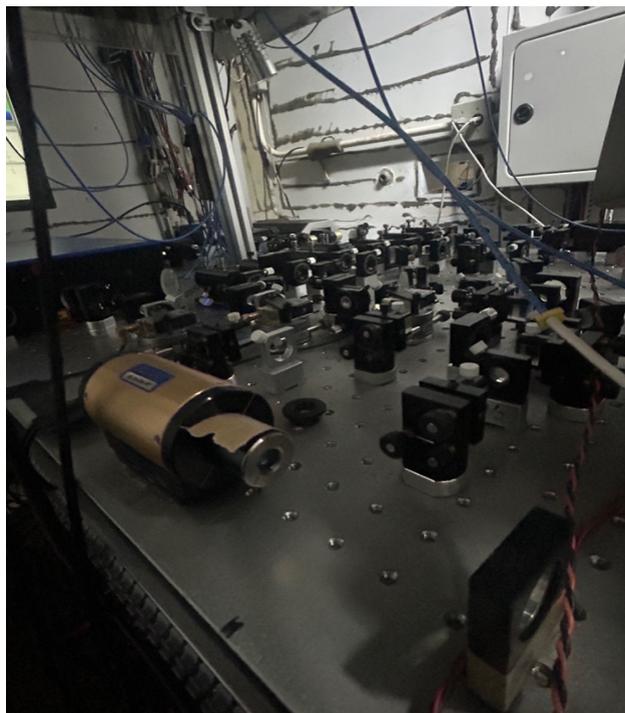
Fonte: Autores (2023)

Figura 15 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (1)



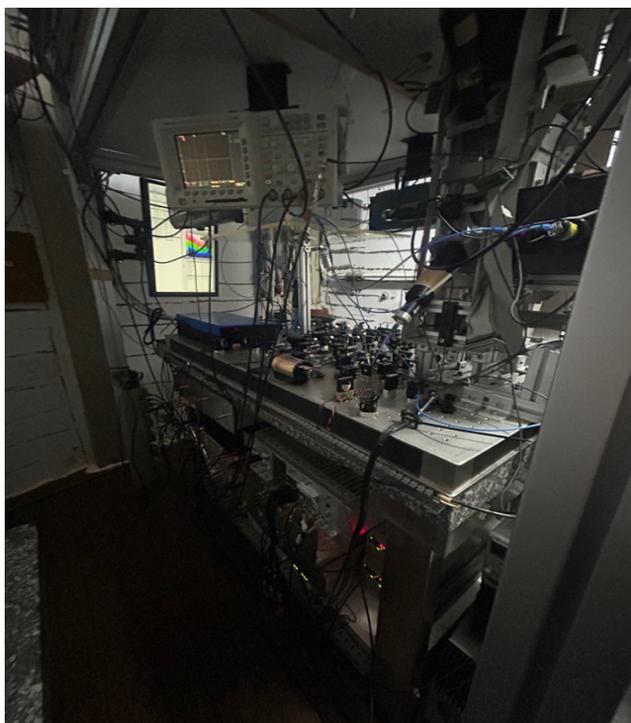
Fonte: Autores (2023)

Figura 16 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (2)



Fonte: Autores (2023)

Figura 17 – Laboratório do relógio atômico do LRTE (3)



Fonte: Autores (2023)

Figura 18 – Central de controle do relógio atômico da USP São Carlos



Fonte: Autores (2023)

A universidade almeja que no futuro os relógios experimentais, como o desenvolvido na USP São Carlos, sejam constantemente aperfeiçoados e se tornem também um ponto de contribuição para a organização internacional, a qual atualmente possui apenas nove países que contribuem com relógios de laboratório, um time seletivo e de elite do qual o Brasil se orgulha em participar. (NAOE, 2019)

De acordo com o IBGE (2020), o Brasil, consegue realizar o sistema de operação de dados de maneira on-line, esse serviço se utiliza informações das órbitas e correções dos relógios dos satélites, dos seus desvios do centro de fase das antenas dos satélites e respectivo receptor, dos modelos de cargas oceânica, velocidade, pressão, temperatura, umidade e ondulação geoidal, para que possa, assim, fazer a correção com a maior precisão possível. Esses fatores podem influenciar diretamente a antena do relógio, fazendo com que haja um desvio em suas medições. Suas principais características são:

- Órbitas e correções dos relógios dos satélites

O IBGE (2020), utiliza os arquivos de órbitas e de correções dos relógios dos satélites, nesses arquivos, as órbitas são categorizadas em 3 tipos: FINAL, RÁPIDA e ULTRA-RÁPIDA, cada uma delas possui uma precisão associada e são disponibilizadas em momentos distintos, como mostrado na figura a seguir:

Figura 19 – Disponibilidade dos Produtos NRCan

Órbitas / Intervalo	Relógios / Intervalo	Constelação	Quando o IBGE-PPP irá utilizar?	Precisão da órbita
Ultra-Rápida (EMU) 15 minutos	EMU (30 segundos)	GPS (1h) e GPS+ GLONASS (3h)	a partir de 1h30m-2h30m após o fim do rastreamento até a disponibilidade das órbitas EMR	± 15 cm
Rápida (EMR) 15 minutos	EMR (30 segundos)	GPS e GLONASS	a partir de 12-36 horas após o fim do rastreamento até a disponibilidade das órbitas EMF	± 5 cm
Final (EMF) 15 minutos	EMF (30 segundos)	GPS e GLONASS	a partir de 11-17 dias após o fim do rastreamento	± 2 cm

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

De acordo com o IBGE (2020), com as informações coletadas com os receptores de GNSS e processadas com as órbitas final, rápida e ultra-rápida (disponibilizada a cada 3h) do NRCan, é possível alcançar soluções determinadas utilizando as constelações GPS

e GLONASS, sendo que os demais processamentos realizados com as órbitas ultrarrápidas (com exceção daquelas disponibilizadas a cada 3h) terão soluções somente GPS.

- **Correção aos efeitos da ionosfera**

No caso da correção decorrente do adiantamento ou atraso da propagação de sinais ocasionados pela ionosfera, as informações coletadas sobre esta camada atmosférica são utilizadas, melhorando, assim, os resultados desse processamento. As informações sobre esta camada são obtidas através de mapas ionosféricos, e, caso esses mapas ainda não estivessem disponíveis no momento do processamento, uma mensagem chegaria ao usuário para aguardar a sua disponibilidade. (IBGE, 2020)

- **Correção dos desvios e variações dos centros de fase das antenas**

Para que as observações no Plano de Referência da Antena sejam realizadas, é necessário que os arquivos de correção do centro de fase sejam utilizados no processamento GNSS, uma vez que estes arquivos detêm os valores do desvio do centro de fase e suas variações para um conjunto de modelos de antenas, os quais são disponibilizados e atualizados constantemente pelo IGS e pelo NGS (National Geodetic Survey). (IBGE, 2020)

- **Modelo de carga oceânica**

O modelo de carga oceânica usado serve para ajustar os efeitos causados pelas marés oceânicas nas observações GNSS. Estas correções são desenvolvidas se a estação a ser processada estiver a uma distância de até 10 km de uma das estações de referência adotada. (IBGE, 2020)

- **Modelo de velocidades**

As coordenadas, como em qualquer outro sistema de referência de concepção global, se alteram com o decorrer do tempo, devido, principalmente ao deslocamento das placas tectônicas e, muito provavelmente, aos movimentos intraplaca, e é por esta razão que as suas coordenadas são referenciadas a uma época específica. (IBGE, 2020)

- **Modelo de Ondulação Geoidal**

Para a modificação das altitudes geométricas em altitudes ortométricas (referidas ao geóide), usa-se o Modelo de Ondulação Geoidal MAPGEO2015. (IBGE, 2020)

- **Aplicabilidade**

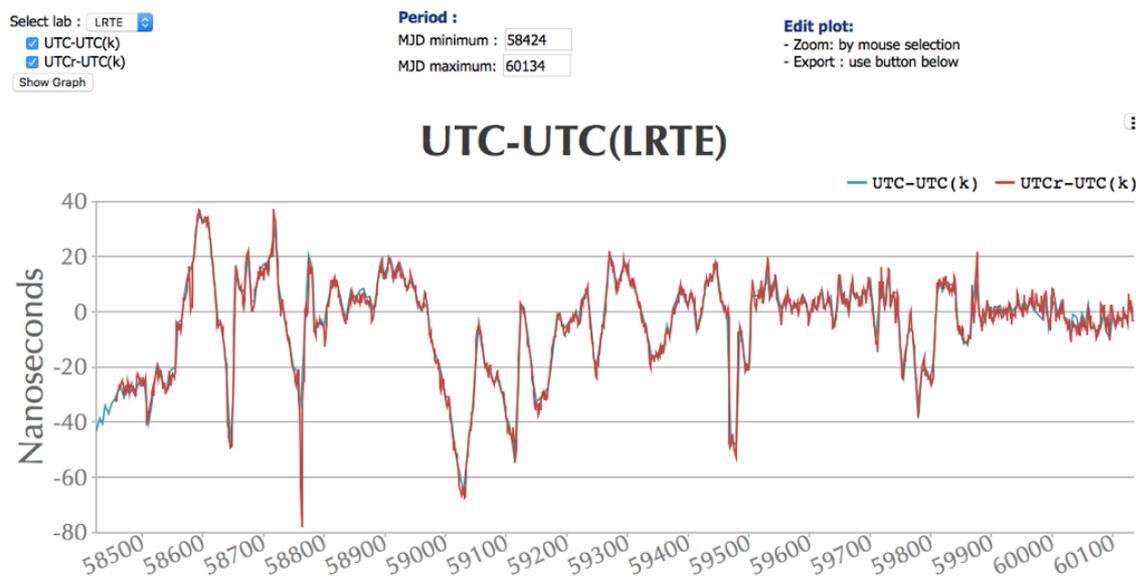
As coordenadas podem ser usadas em várias aplicações tais como: no georreferenciamento, topografia em geral, avaliação de levantamentos, determinação de bases, entre outras. Contudo, é fundamental que o levantamento seja realizado com equipamentos adequados e em condições favoráveis para a obtenção de uma melhor precisão, tais como: o tempo de rastreamento, estacionamento do equipamento, baixa ou nenhuma obstrução das observáveis, entre outras. (IBGE, 2020)

4 PROCESSAMENTOS DOS DADOS DE LOCALIZAÇÃO DA ANTENA DO RELÓGIO ATÔMICO DO LRTE

Diariamente, o relógio atômico do laboratório LRTE da USP São Carlos fornece dados não só do horário, mas também de coordenadas de geoposicionamento de sua antena, a fim de que seja possível diminuir a margem de erro por efeitos externos, tais como pluviosidade e ventos atmosféricos.

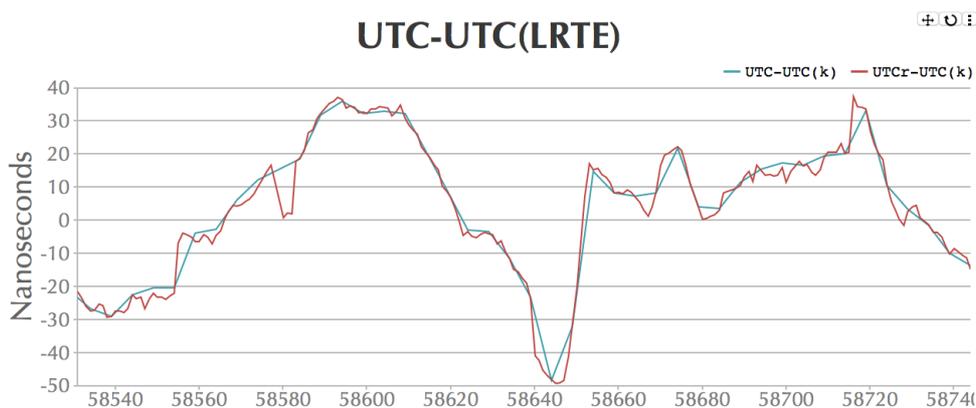
O LRTE já possui grande precisão em suas medições como pode ser visto nos gráficos abaixo, uma vez que sua variação, se comparada ao relógio atômico do INMETRO, o qual controla a hora nacional, possui uma medição muito mais precisa e estável. A seguir temos gráficos de comparação entre o LRTE e o UTC, como também entre o INXE (relógio atômico do INMETRO) e o UTC

Figura 20 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (1)



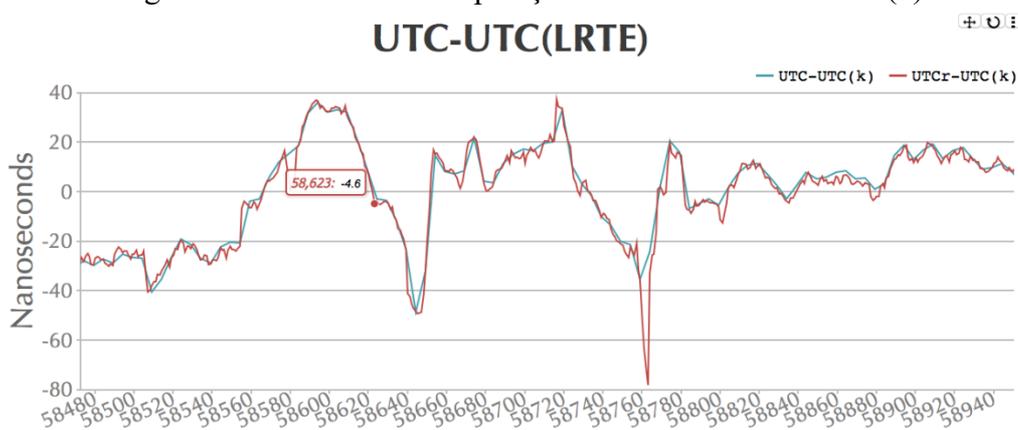
Fonte: BIPM (2023)

Figura 21 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (2)



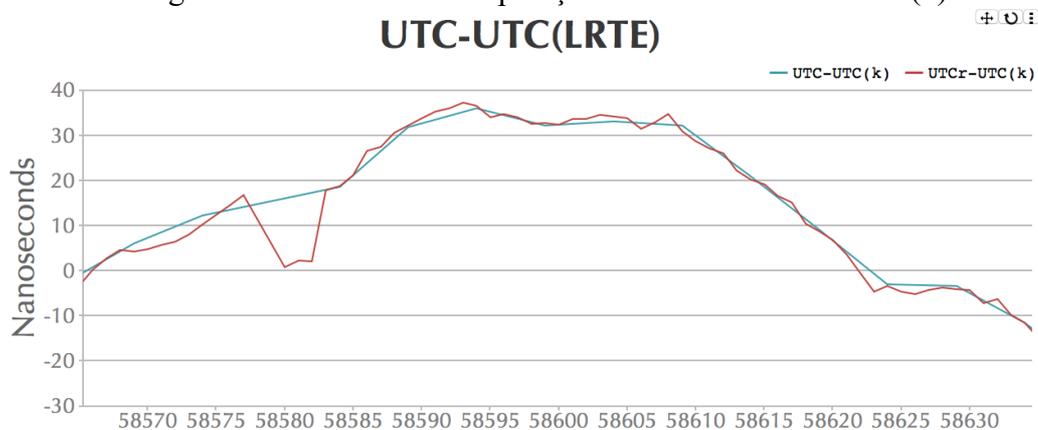
Fonte: BIPM (2023)

Figura 22 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (3)



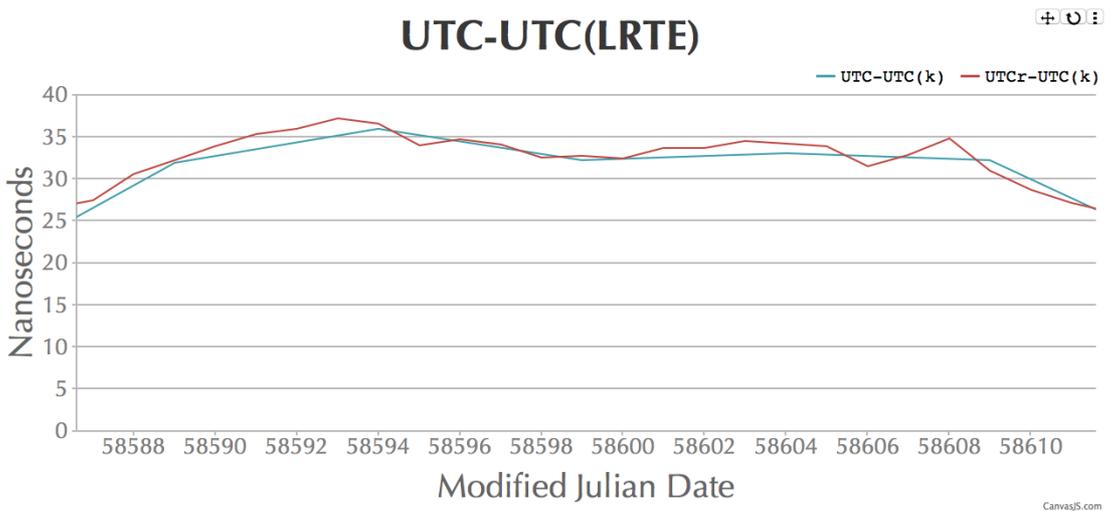
Fonte: BIPM (2023)

Figura 23 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (4)



Fonte: BIPM (2023)

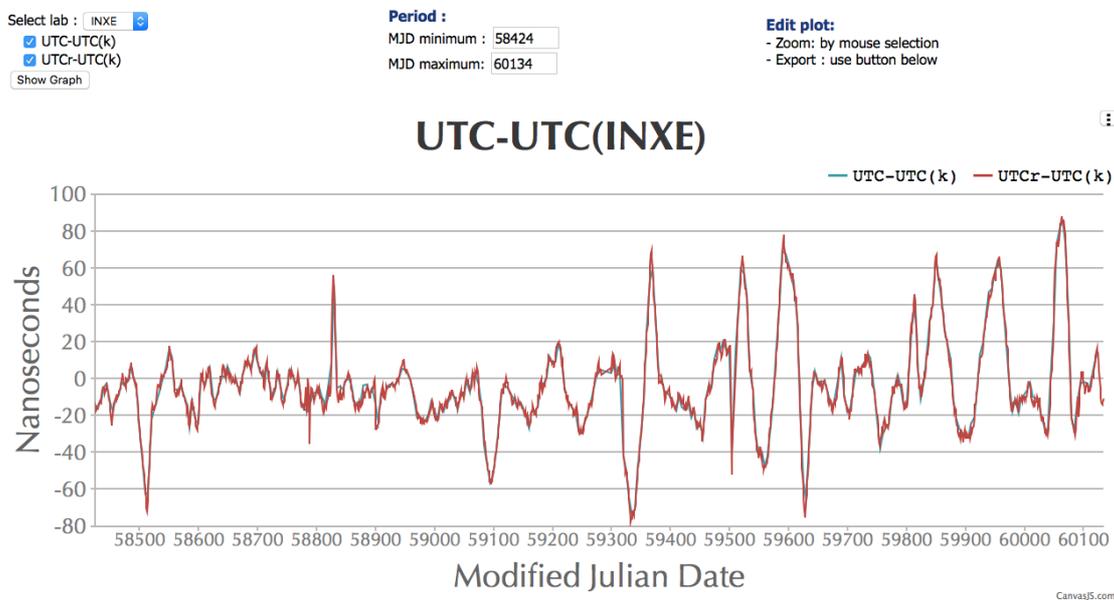
Figura 24 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o UTC (5)



Fonte: BIPM (2023)

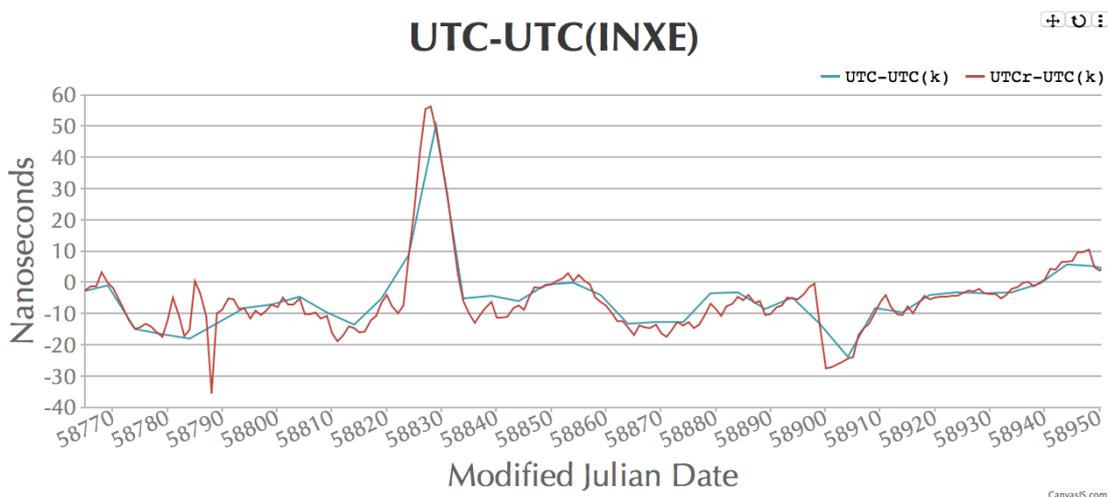
Abaixo, temos o gráfico referente ao INXE, o relógio atômico utilizado pelo INMETRO no Brasil, podemos é possível verificar que a margem de erro se apresenta bem maior do que em relação ao LRTE da USP São Carlos.

Figura 25 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (1)



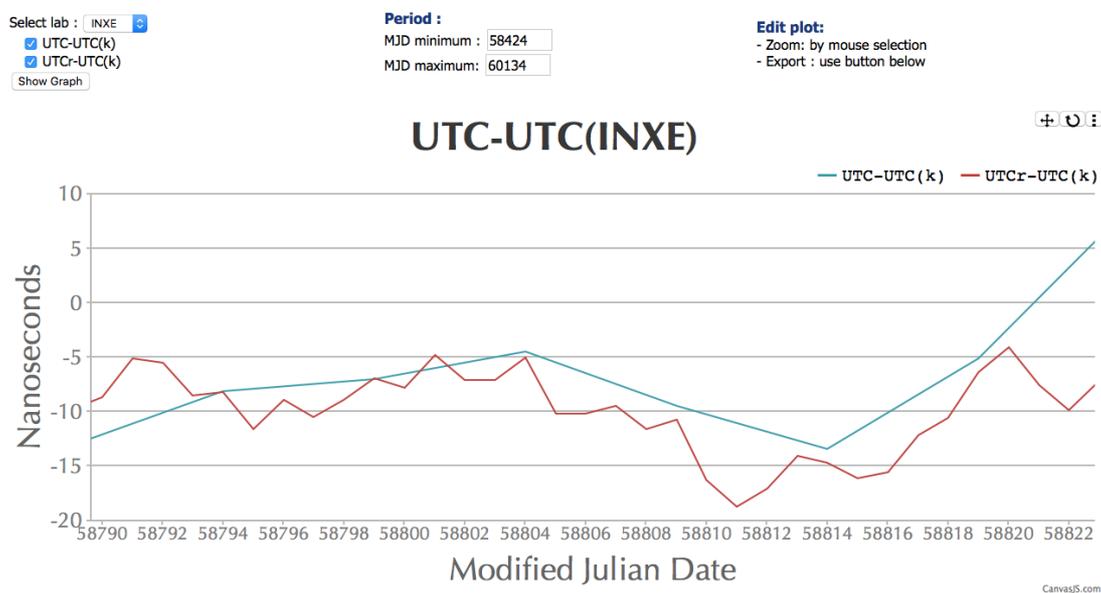
Fonte: BIPM (2023)

Figura 26 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (2)



Fonte: BIPM (2023)

Figura 27 – Gráfico de comparação entre o LRTE e o INXE (3)



Fonte: BIPM (2023)

Os gráficos possuem suas coordenadas em nanosegundos e em Dia Juliano Modificado, essa contagem de dias foi utilizada para otimizar o entendimento. Segundo Edwards (2020), o Dia Juliano Modificado (MJD - Modified Julian Day, em inglês) é

uma medida do tempo amplamente utilizada em astronomia e em algumas áreas relacionadas, como a geodésia. É uma modificação do conceito original do Dia Juliano, que é uma forma de contar os dias decorridos desde uma data de referência. O Dia Juliano Modificado foi introduzido para simplificar os cálculos astronômicos e evitar algumas dificuldades do sistema original do Dia Juliano. No sistema MJD, o dia é contado a partir do meio-dia universal (Tempo Universal Coordenado, UTC) do dia 17 de novembro de 1858. Isso foi feito para alinhar o sistema MJD com o sistema de datação astronômica que estava em uso na época.

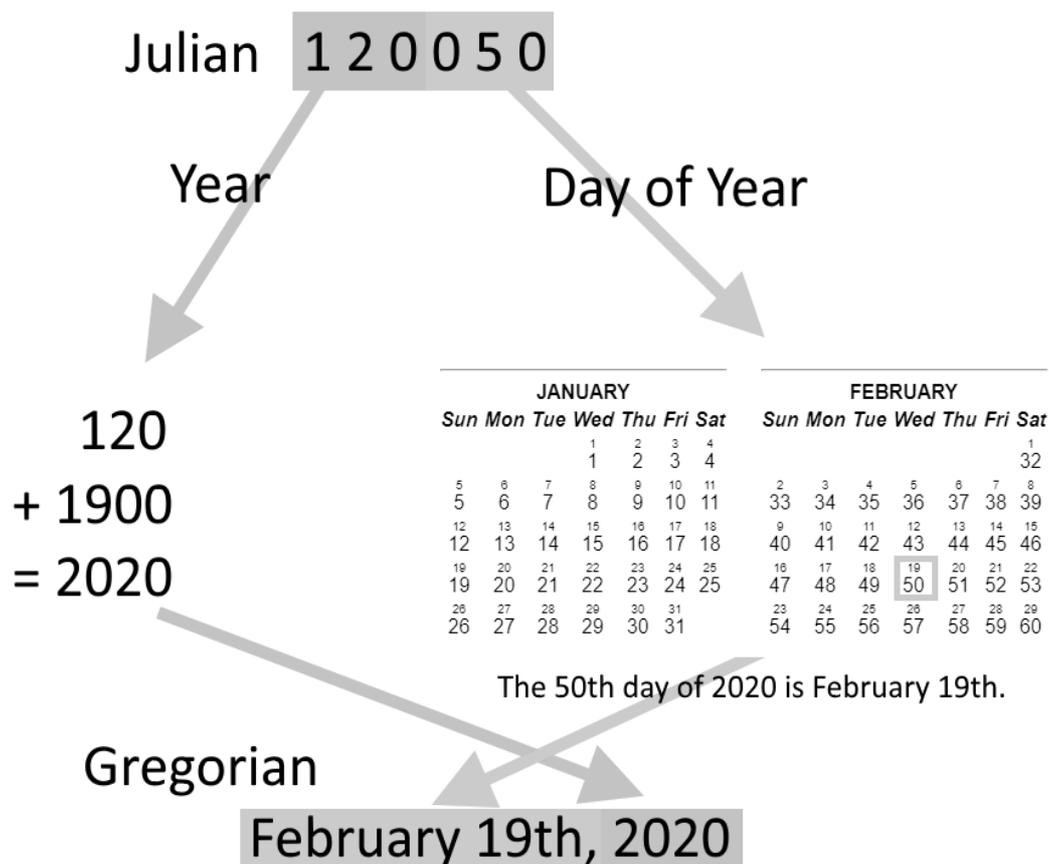
Para Edwards (2020), a principal diferença entre o MJD e o Dia Juliano convencional é que o MJD não leva em conta as horas, minutos e segundos de um determinado dia. Em vez disso, apenas o número inteiro de dias é contado a partir do dia de referência, como mencionado anteriormente. A fórmula para converter uma data e hora no sistema de datação convencional para o MJD é a seguinte:

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2.400.000,5$$

onde JD é o Dia Juliano convencional correspondente à data e hora em questão.

De acordo com Edwards (2020), o MJD é usado principalmente em cálculos astronômicos de longo prazo, como na determinação das efemérides (posições astronômicas) dos corpos celestes, cálculos de movimentos orbitais e estudos de eventos astronômicos históricos. Também é utilizado em sistemas de rastreamento de satélites, onde a precisão da data e hora é crucial para cálculos de posicionamento precisos. Em resumo, o Dia Juliano Modificado é uma forma de contar os dias a partir de uma data de referência específica, simplificando os cálculos astronômicos e proporcionando uma medida de tempo amplamente utilizada em astronomia e outras áreas relacionadas. Ele conta apenas o número inteiro de dias desde o meio-dia universal de 17 de novembro de 1858, sem levar em consideração as horas, minutos e segundos, tudo isso pode ser melhor representado na figura a seguir:

Figura 28 – Dia Juliano Modificado

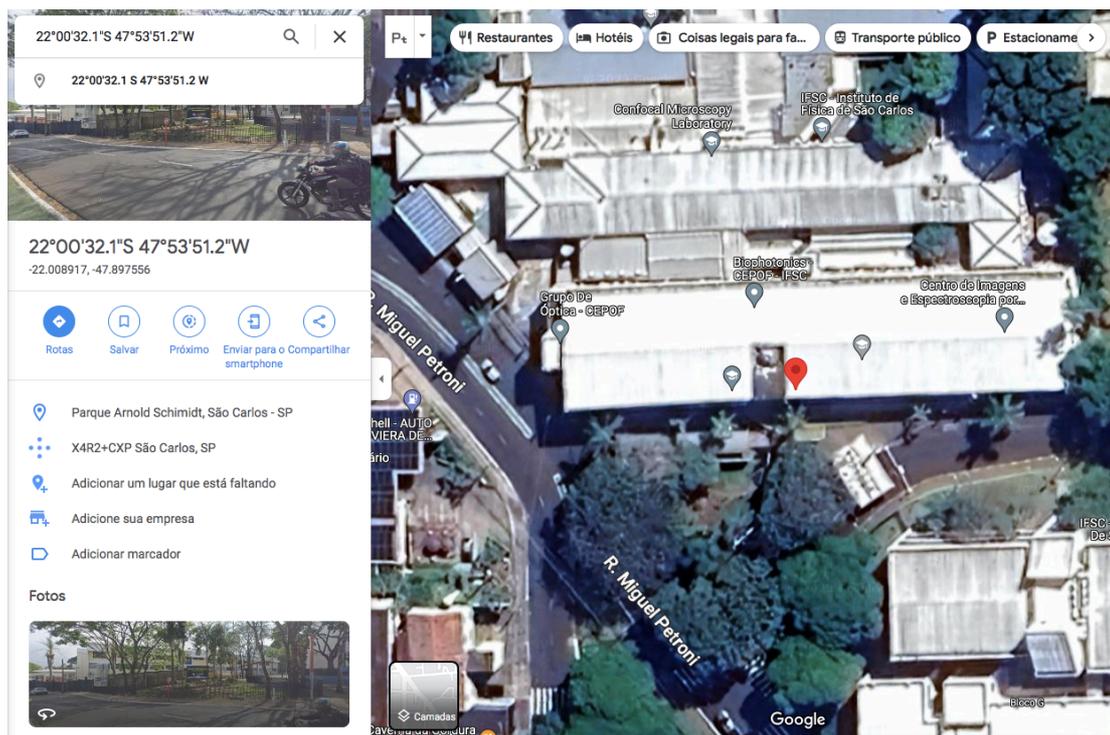


Fonte: Edwards (2020)

A fim de contribuir ainda mais com essa precisão, este trabalho tem por objetivo mostrar como os fatores externos contribuem com as coordenadas de posicionamento da antena, e também verificar com a maior precisão possível o posicionamento exato dessa antena.

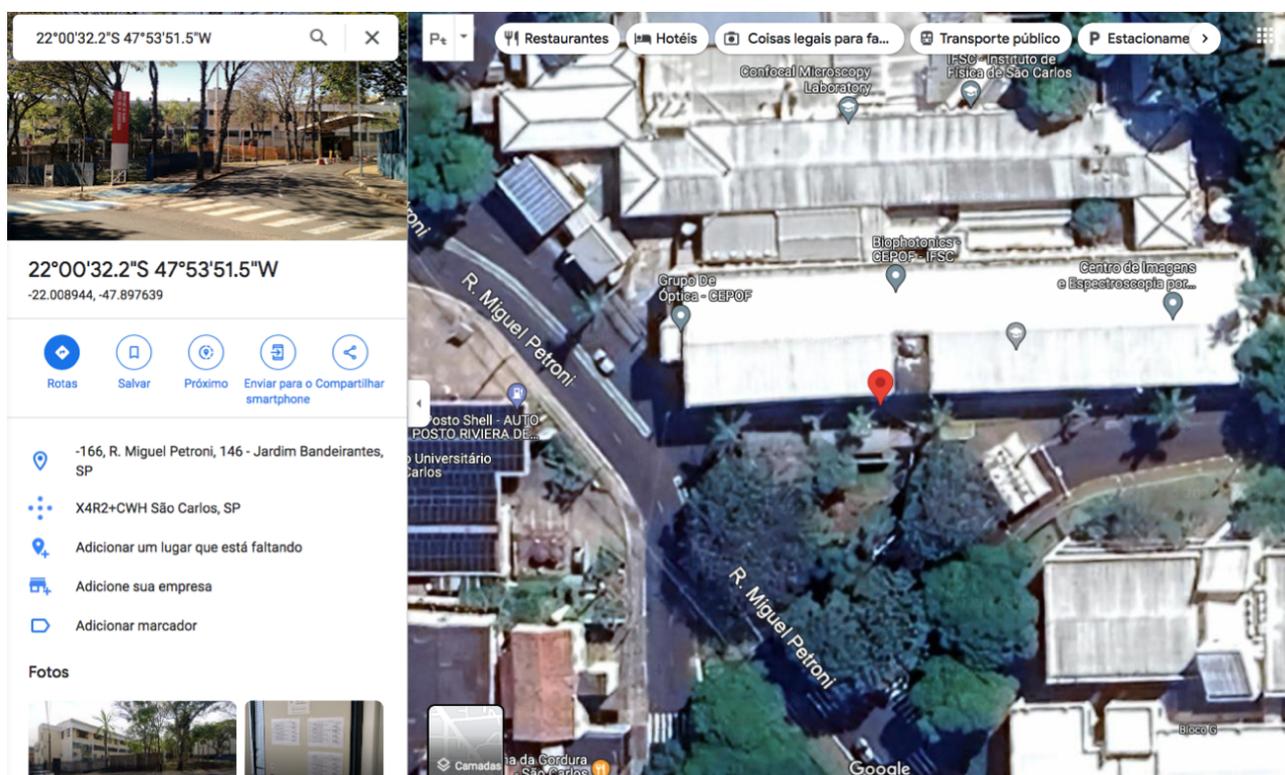
Um exemplo rápido e didático que podemos ter é diretamente através do Google MAPS, o sistema de posicionamento por satélites do Google, um dos mais utilizados atualmente. Ao colocarmos duas coordenadas selecionadas em dias aleatórios, podemos ver a pequena diferença de posicionamento do ponto em vermelho. Apesar de pequeno, esse leve erro de posicionamento real existe devido à variação climática existente durante os dias e estações do ano

Figura 29 – Posicionamento da antena (1)



Fonte: Autores (2023)

Figura 30 – Posicionamento da antena (2)



Fonte: Autores (2023)

Com o objetivo de alcançar o posicionamento mais preciso possível, uma meticulosa seleção de 30.674 conjuntos, sendo uma média diária de 96 dados selecionados, resultando em uma análise de cerca de 320 dias de dados que foram cuidadosamente organizados para examinar todas as informações geradas pelo relógio.

Esses dados consistem em arquivos diários, os quais são gerados e registrados a cada quinze minutos. Em outras palavras, a cada intervalo de 30 segundos, ocorre a captura de dados referentes ao posicionamento da antena pelo relógio. Portanto, em média, aproximadamente 2.880 conjuntos de dados são capturados diariamente e, em seguida, encaminhados ao BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) para análise e processamento. Esse rigoroso processo de coleta e envio dos dados visa garantir a máxima precisão e confiabilidade nas medições realizadas.

Figura 31 – Exemplo de arquivo de dados de posicionamento da antena gerados pelo relógio atômico do LRTE

```

1 % program : RTKPOST-OT ver.demo5 b34g
2 % inp file : /home/clock/Documents/dados_naiara/rinex/rin/*.230
3 % inp file : /home/clock/Documents/dados_naiara/rinex/rin/*.23N
4 % obs start : 2023/01/01 00:00:00.0 GPST (week2243 0.0s)
5 % obs end : 2023/03/15 03:29:00.0 GPST (week2253 271740.0s)
6 % pos mode : Single
7 % elev mask : 15.0 deg
8 % ionos opt : Broadcast
9 % tropo opt : Saastamoinen
10 % ephemeris : Broadcast
11 % navi sys : GPS
12 %
13 % (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
14 % GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdun(m) age(s) ratio
15 2023/01/01 00:00:00.000 -22.008944156 -47.897537194 857.8843 5 7 3.1870 3.0037 8.8767 -0.4433 -2.3390 0.8949 0.00 0.0
16 2023/01/01 00:00:30.000 -22.008946797 -47.897538328 857.8482 5 7 3.1840 2.9957 8.8562 -0.4322 -2.3084 0.8768 0.00 0.0
17 2023/01/01 00:01:00.000 -22.008939803 -47.897541391 858.0394 5 7 3.1811 2.9878 8.8356 -0.4211 -2.2775 0.8595 0.00 0.0
18 2023/01/01 00:01:30.000 -22.008944458 -47.897538272 856.9428 5 7 3.1781 2.9800 8.8150 -0.4100 -2.2463 0.8432 0.00 0.0
19 2023/01/01 00:02:00.000 -22.008944063 -47.897535325 856.2217 5 7 3.1751 2.9722 8.7944 -0.3989 -2.2148 0.8279 0.00 0.0
20 2023/01/01 00:02:30.000 -22.008942517 -47.897533153 856.2906 5 7 3.1720 2.9646 8.7738 -0.3878 -2.1830 0.8135 0.00 0.0
21 2023/01/01 00:03:00.000 -22.008939784 -47.897538830 856.7313 5 7 3.1690 2.9571 8.7532 -0.3766 -2.1508 0.8002 0.00 0.0
22 2023/01/01 00:03:30.000 -22.008940404 -47.897532278 856.2682 5 7 3.1659 2.9497 8.7327 -0.3654 -2.1182 0.7881 0.00 0.0
23 2023/01/01 00:04:00.000 -22.008935616 -47.897536593 850.2736 5 8 3.0405 2.8755 8.0241 0.6466 -2.5429 1.8867 0.00 0.0
24 2023/01/01 00:04:30.000 -22.008927959 -47.897539373 850.4289 5 8 3.0371 2.8663 8.0077 0.6586 -2.5196 1.8799 0.00 0.0
25 2023/01/01 00:05:00.000 -22.008939239 -47.897532397 855.3749 5 7 3.1565 2.9281 8.6710 -0.3314 -2.0185 0.7591 0.00 0.0
26 2023/01/01 00:05:30.000 -22.008903429 -47.897530853 844.1628 5 7 3.7411 2.9256 9.3515 1.3898 -3.0627 -2.6881 0.00 0.0
27 2023/01/01 00:06:00.000 -22.008903673 -47.897529603 843.5502 5 7 3.7369 2.9173 9.3578 1.3961 -3.0494 -2.7053 0.00 0.0
28 2023/01/01 00:06:30.000 -22.008929911 -47.897537807 850.5627 5 8 3.0236 2.8302 7.9430 0.7025 -2.4251 1.8567 0.00 0.0
29 2023/01/01 00:07:00.000 -22.008902733 -47.897529174 843.1800 5 7 3.7283 2.9007 9.3696 1.4075 -3.0219 -2.7368 0.00 0.0
30 2023/01/01 00:07:30.000 -22.008902616 -47.897530043 845.3722 5 7 3.7239 2.8925 9.3750 1.4127 -3.0077 -2.7511 0.00 0.0
31 2023/01/01 00:08:00.000 -22.008914126 -47.897532158 847.7270 5 6 4.8731 2.9021 13.0030 0.9991 -2.4631 -5.9997 0.00 0.0
32 2023/01/01 00:08:30.000 -22.008936899 -47.897532916 854.9175 5 7 3.1336 2.8817 8.5277 -0.2453 -1.7712 0.7386 0.00 0.0
33 2023/01/01 00:09:00.000 -22.008927531 -47.897538512 851.0583 5 8 3.0070 2.7868 7.8638 0.7502 -2.3036 1.8364 0.00 0.0
34 2023/01/01 00:09:30.000 -22.008930363 -47.897536996 855.9986 5 7 3.1268 2.8694 8.4870 -0.2169 -1.6960 0.7454 0.00 0.0
35 2023/01/01 00:10:00.000 -22.008926232 -47.897532229 854.6874 5 7 3.1233 2.8635 8.4667 -0.2015 -1.6576 0.7599 0.00 0.0
36 2023/01/01 00:10:30.000 -22.008912213 -47.897531043 847.7120 5 6 4.8673 2.8680 13.1239 0.9368 -2.2519 -6.0788 0.00 0.0

```

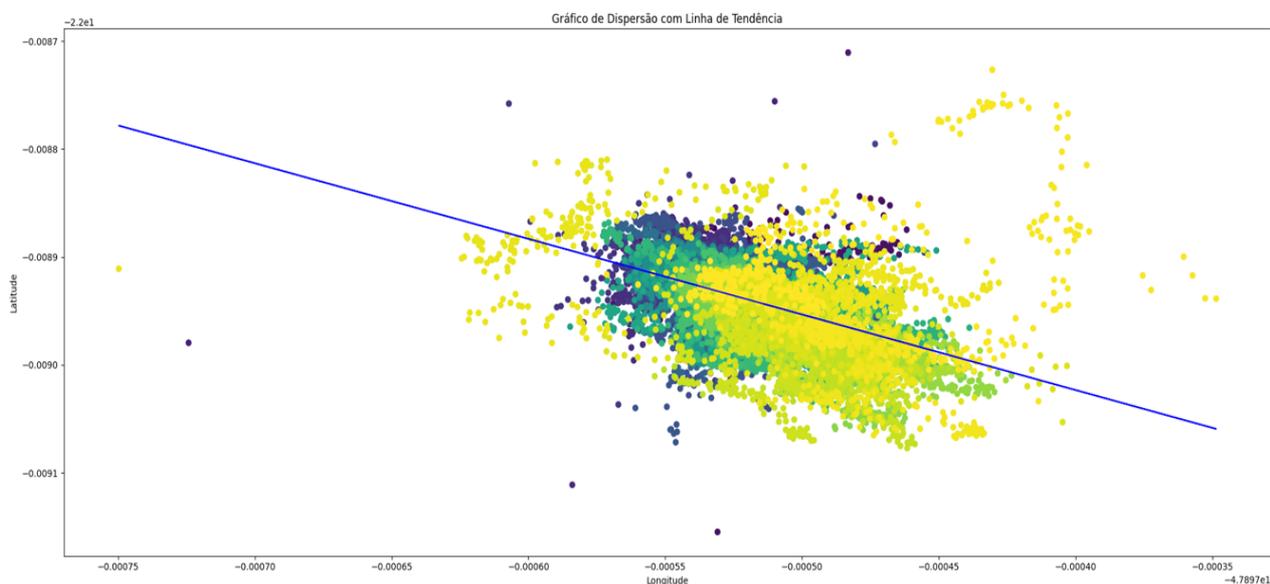
Fonte: Autores (2023)

Para melhor análise e obtenção com extrema precisão do posicionamento da antena, foi gerado um gráfico de dispersão em que cada um dos seus pontos indica o

posicionamento da antena gerada pelo relógio, tudo isso pode ser verificado no programa realizado em Python 3.11.4 disponível no Apêndice 1, o qual foi esboçado em colorido somente para efeito didático e melhor visualização dos pontos.

Com o auxílio desse código podemos gerar esse gráfico de dispersão com seus incríveis 30.674 pontos, encontrando, assim, o ponto mais central e preciso, indicando o posicionamento mais correto possível da antena do relógio atômico do LRTE.

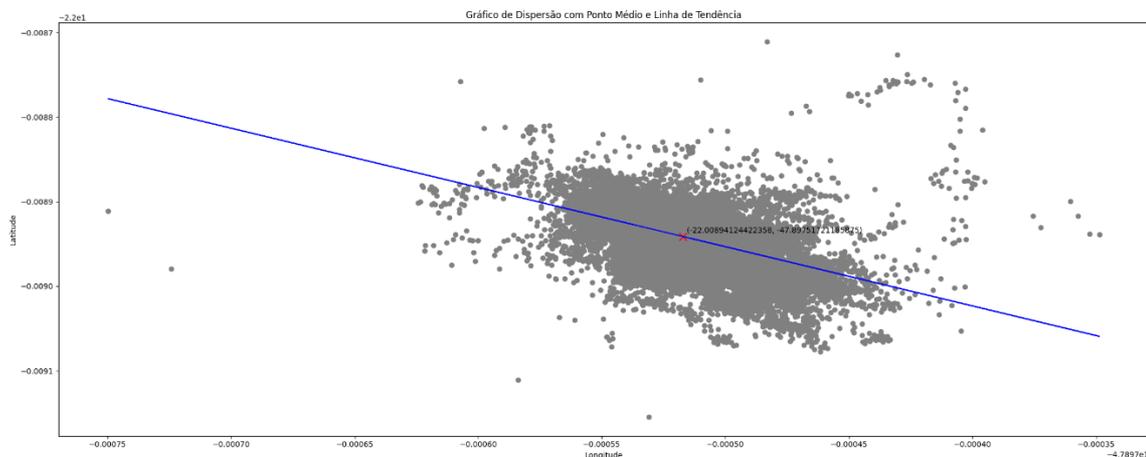
Figura 32 – Gráfico de dispersão, com todos os pontos



Fonte: Autores (2023)

Em resumo, conseguimos estabelecer um ponto de referência de extrema precisão em relação aos dados coletados. Esse ponto representa a média dos demais pontos que estão dispersos ao longo da linha de dispersão. Em outras palavras, é como se encontrássemos o epicentro, o ponto central ao redor do qual os demais dados se distribuem. Essa abordagem nos proporciona uma visão clara e concisa da tendência geral dos dados e nos permite identificar com mais clareza padrões ou variações significativas que possam influenciar nossa análise e tomada de decisões.

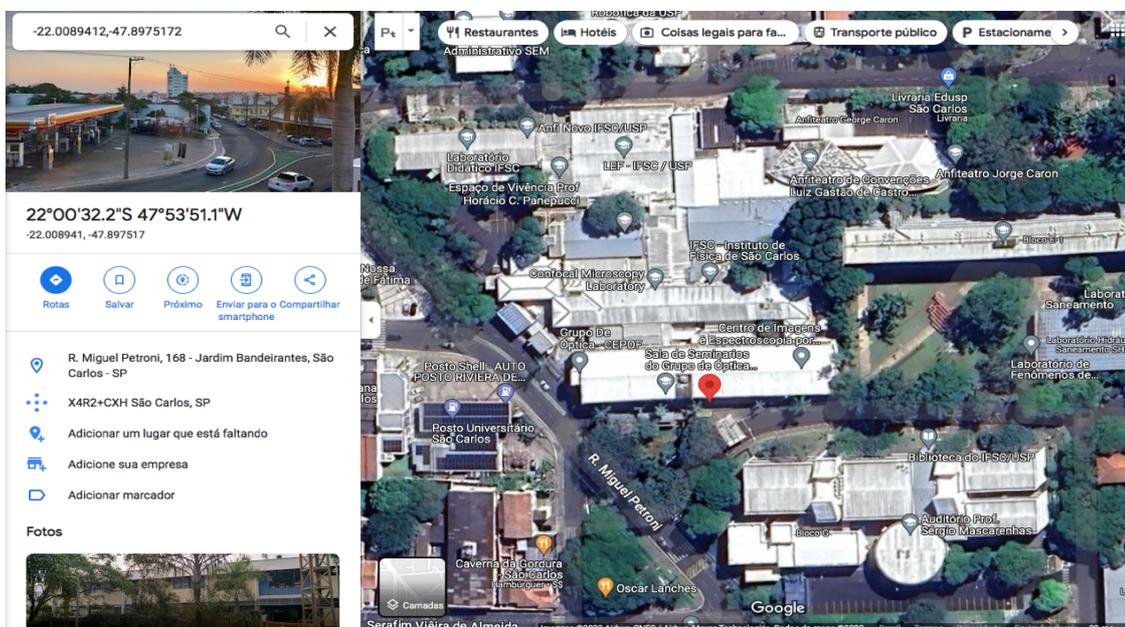
Figura 33 – Gráfico de dispersão apresentando o ponto médio



Fonte: Autores (2023)

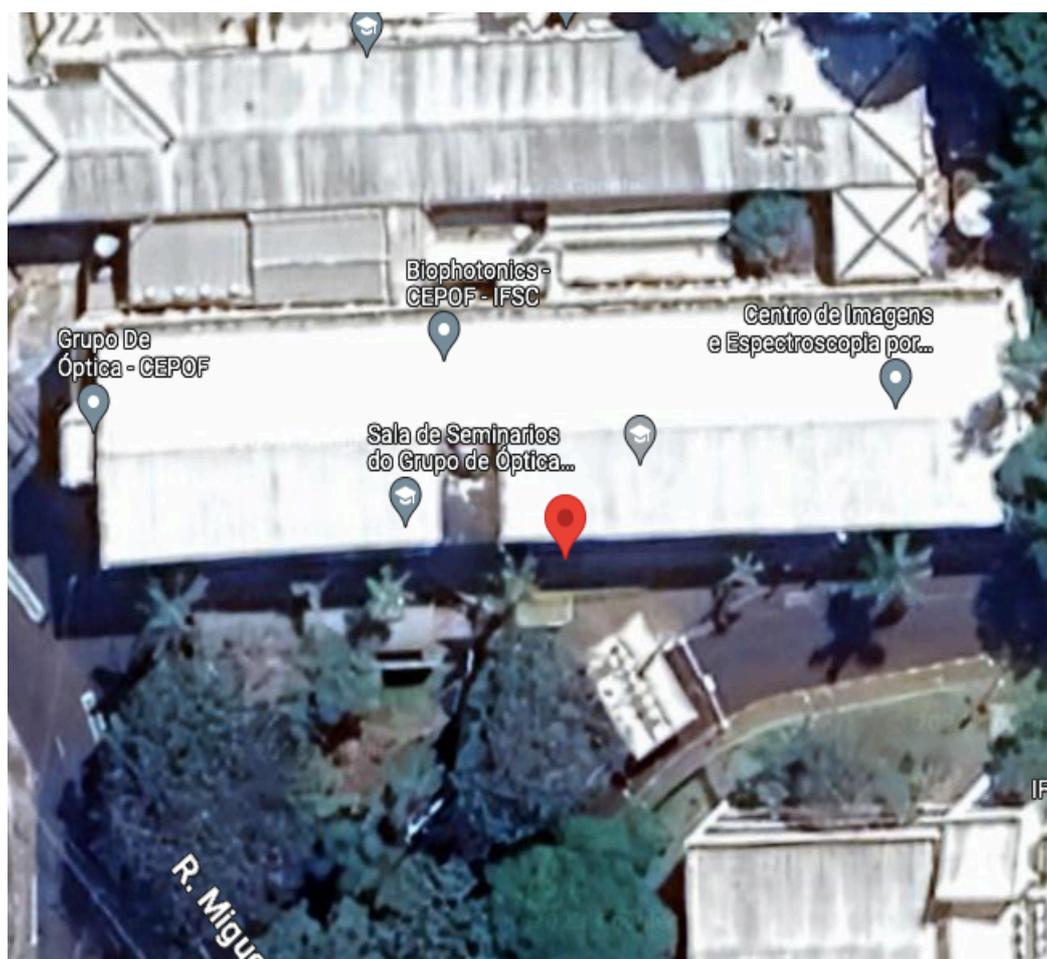
Esse ponto médio do posicionamento da antena é a coordenada geográfica : $22^{\circ}00'32.2''S$ $47^{\circ}53'51.1''W$, quando inserida no Google Maps, permite verificar o posicionamento mais correto da antena, conforme demonstra a figura a seguir:

Figura 34 – Posicionamento mais preciso da antena do relógio atômico (1)



Fonte: Autores (2023)

Figura 35 – Posicionamento mais preciso da antena do relógio atômico (2)



Fonte: Autores (2023)

Nesses gráficos, é possível observar como alguns pontos fogem totalmente aos demais, isso ocorre principalmente devido à variação do clima, como a umidade e a temperatura. O relógio atômico também consegue auxiliar para verificar o que ocorreu na variação meteorológica, pois ele emite dados diários, como o exemplo abaixo, no qual há o TE para a temperatura externa e o HE para umidade externa.

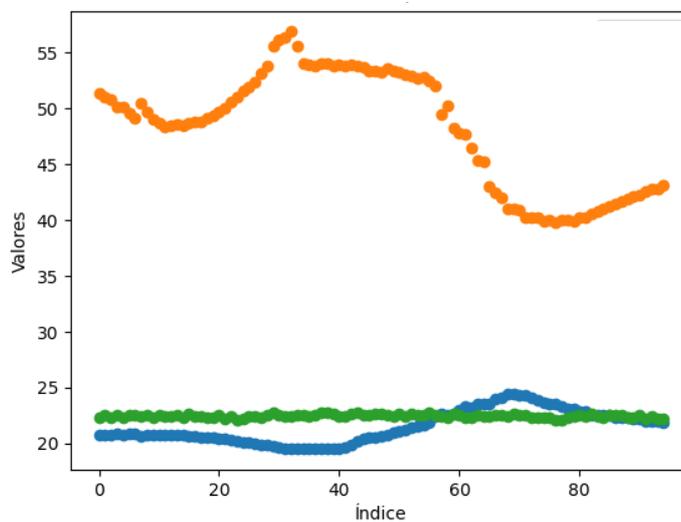
Figura 36 – Exemplo de arquivo de dados meteorológicos gerados no LRTE

1	METEOROLOGICAL DATA CCTF V1.0										DATA TYPE		
2	MeteoData LRTE										Aug 25, 2022 00:00	PGM / RUN BY / DATE	
3											COMMENT		
4	LRTE										LAB NAME		
5	5	PR	TE	HE	TI	HI					# / TYPES OF OBSERV		
6	Bosch			BME280								1.0 PR	SENSOR MOD/TYPER/ACC
7	Bosch			BME280								0.1 TE	SENSOR MOD/TYPER/ACC
8	Bosch			BME280								3.0 HE	SENSOR MOD/TYPER/ACC
9	Bosch			BME280								0.1 TI	SENSOR MOD/TYPER/ACC
10	Bosch			BME280								3.0 HI	SENSOR MOD/TYPER/ACC
11	END OF HEADER												
12	22	8	25	0	15	1	924.8	20.8	51.4	22.3	32.7		
13	22	8	25	0	30	1	924.8	20.8	51.0	22.5	33.1		
14	22	8	25	0	45	1	924.8	20.8	50.8	22.3	31.6		
15	22	8	25	1	0	1	924.6	20.9	50.2	22.6	34.3		
16	22	8	25	1	15	1	924.7	20.8	50.2	22.3	33.9		
17	22	8	25	1	30	1	924.7	20.9	49.6	22.5	32.6		
18	22	8	25	1	45	1	924.8	20.9	49.2	22.5	34.7		
19	22	8	25	2	0	1	924.8	20.7	50.5	22.4	31.8		
20	22	8	25	2	15	1	924.7	20.8	49.7	22.6	34.5		
21	22	8	25	2	30	1	924.7	20.8	49.0	22.3	32.2		
22	22	8	25	2	45	1	924.7	20.8	48.7	22.6	32.9		
23	22	8	25	3	0	1	924.6	20.8	48.4	22.4	34.7		
24	22	8	25	3	15	1	924.6	20.8	48.5	22.4	31.2		
25	22	8	25	3	30	1	924.5	20.8	48.6	22.5	34.3		
26	22	8	25	3	45	1	924.3	20.8	48.5	22.3	31.7		
27	22	8	25	4	0	1	924.2	20.7	48.7	22.7	34.6		
28	22	8	25	4	15	1	924.1	20.7	48.8	22.4	34.2		
29	22	8	25	4	30	1	923.9	20.6	48.8	22.4	31.7		
30	22	8	25	4	45	1	923.7	20.5	49.1	22.3	34.7		
31	22	8	25	5	0	1	923.7	20.5	49.4	22.3	31.7		
32	22	8	25	5	15	1	923.7	20.4	49.7	22.6	33.6		

Fonte: Autores (2023)

Com base nos dados coletados, foi desenvolvido um gráfico que ilustra a variação de três variáveis: temperatura externa (azul), temperatura interna (verde) e umidade (laranja). Essas variáveis são de suma importância, pois exercem uma influência direta sobre o posicionamento ideal da antena. Como resultado, os pontos mais distantes observados anteriormente no gráfico de dispersão são gerados pela interação complexa desses fatores. A análise da relação entre temperaturas e umidade é crucial para entender os padrões de comportamento da antena em diferentes condições ambientais. Ao representar essas variáveis em um gráfico, podemos visualizar de forma mais clara como cada uma delas afeta o desempenho e a posição ótima da antena em relação ao ambiente externo. Portanto, o gráfico elaborado oferece uma valiosa representação visual das interações dinâmicas entre temperaturas e umidade externa, fornecendo insights importantes para otimizar o posicionamento e a operação eficaz da antena em diversas condições atmosféricas.

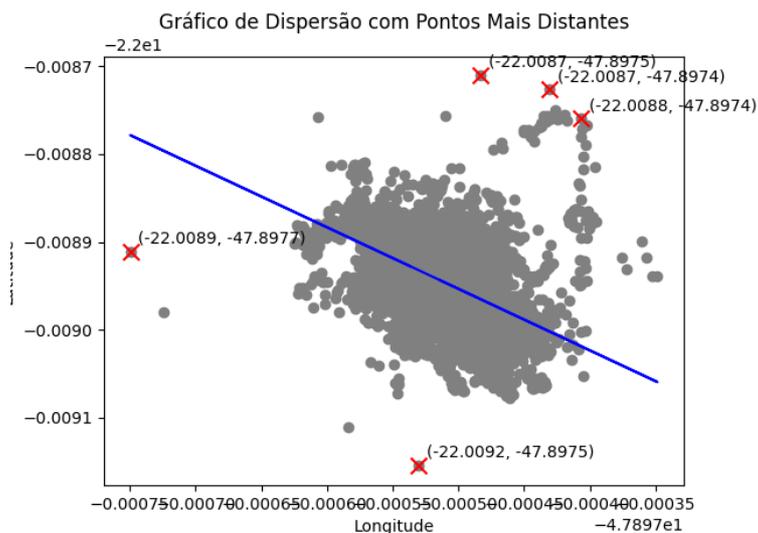
Figura 37 – Gráfico de variação meteorológica



Fonte: Autores (2023)

O código usando também foi gerado através do Python 3.11.4 disponível no Apêndice 2. Com o intuito de poder demonstrar cada vez mais a eficiência das medições demonstradas, um código que consegue descrever as coordenadas exatas de alguns pontos mais distantes do ponto central foi elaborado conforme disponível no código no Apêndice 3. Com esse código foi possível gerar as coordenadas exatas de alguns pontos extremos apresentados no gráfico anteriormente citado:

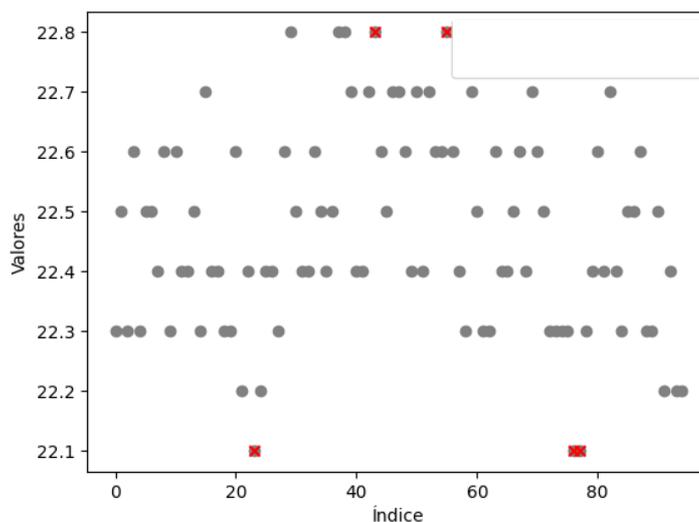
Figura 38 – Gráfico de dispersão com coordenadas dos pontos extremos



Fonte: Autores (2023)

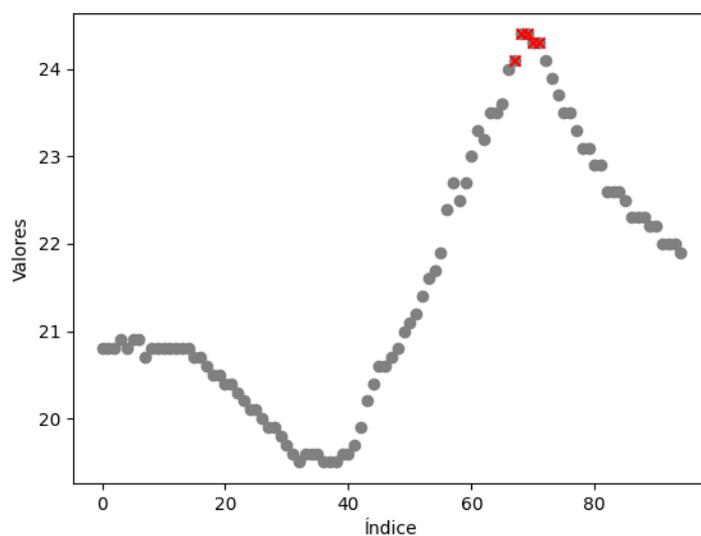
Partindo desses cinco pontos encontrados, foi realizada uma comparação entre os dois gráficos, demonstrando que esses pontos fugiram muito do ponto central devido à variação de temperaturas e umidade que ocorreu no dia em que eles foram gerados conforme o código disponível no apêndice 4. Com esse código foi gerado três gráficos que conseguem demonstrar qual o posicionamento dos pontos mais extremos gerados anteriormente:

Figura 39 – Gráfico de temperatura interna com os pontos extremos



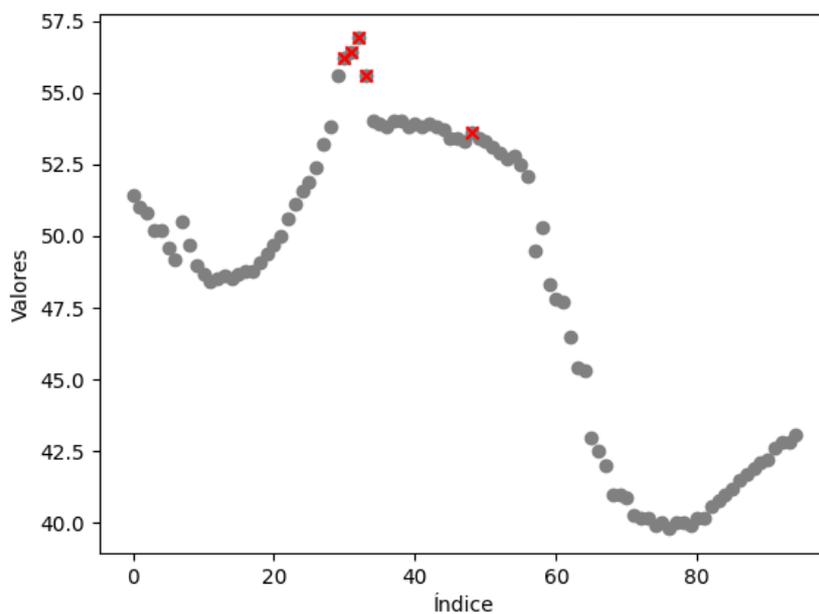
Fonte: Autores (2023)

Figura 40 – Gráfico de temperatura externa com os pontos extremos



Fonte: Autores (2023)

Figura 41 – Gráfico de HE com os pontos extremos



Fonte: Autores (2023)

Após uma análise detalhada dos resultados, fica evidente uma correlação significativa entre os pontos presentes no gráfico de dispersão e aqueles gerados nos gráficos individuais de umidade e temperaturas. Pontos mais distantes no gráfico de dispersão tendem a indicar maiores variações nessas variáveis climáticas específicas.

Essa observação sugere que a distância entre os pontos no gráfico de dispersão está diretamente relacionada aos efeitos climáticos experimentados no dia da coleta de dados. Por exemplo, variações bruscas de temperaturas ou umidade externa podem resultar em pontos mais dispersos no gráfico, refletindo a influência dessas condições climáticas na posição da antena. A ligação entre a dispersão dos pontos no gráfico e as oscilações climáticas oferece uma base sólida para reflexões mais aprofundadas e pesquisas subsequentes. Essa correlação não apenas fornece insights valiosos sobre como o ambiente afeta o posicionamento da antena, mas também abre caminho para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para lidar com essas variações climáticas e otimizar o desempenho da antena em condições diversas e dinâmicas.

5 CONCLUSÃO

De acordo com todo o conteúdo apresentado, foi possível verificar a importância do relógio atômico em nosso cotidiano, como sua evolução e constante uso, não só nacional, como internacionalmente. Essa dissertação teve por principal objetivo demonstrar, além do funcionamento e conceitos do relógio atômico, como podemos gerar o posicionamento da antena do relógio situado no laboratório da USP São Carlos, reiterando a sua importância para a pesquisa nacional e internacional e sua interferência direta no cotidiano de qualquer pessoa. Além disso, o relógio consegue e está plenamente apto ao envio de dados ao BIPM, contribuindo, assim, para a hora mundial que está presente, não só em celulares e computadores, mas também no controle mundial de GPS e GNSS.

Em suma, o relógio atômico é uma invenção revolucionária que desempenha um papel fundamental na nossa sociedade moderna. Sua precisão e estabilidade permitiram avanços significativos em diversos campos, desde a ciência e tecnologia até a comunicação e navegação. Além disso, também serve como referência para o tempo universal e fornece a base para sistemas de posicionamento global, como o GPS, que impactam nossas vidas diariamente. Através do estudo e desenvolvimento contínuo do relógio atômico, temos a oportunidade de aprimorar ainda mais a compreensão do tempo e aperfeiçoar a sincronização precisa em todo o mundo.

Essa precisão é crucial para a realização de experimentos científicos avançados, como testes em física fundamental e a exploração do universo. Aplicações práticas, como a segurança nas comunicações e transações financeiras, igualmente dependem da precisão dos relógios atômicos. Desse modo, é importante reconhecer que o desenvolvimento e a disseminação dos relógios atômicos não são apenas uma conquista científica, mas também uma conquista colaborativa que envolve diversos países e organizações. A cooperação internacional nesse campo é fundamental para garantir que todos tenham acesso à hora precisa e à tecnologia relacionada. No entanto, à medida que o relógio atômico continua a evoluir, é necessário considerar as questões éticas e sociais relacionadas ao seu uso. Devemos estar atentos ao potencial de dependência excessiva e até mesmo de vulnerabilidades em sistemas que confiam exclusivamente na precisão do relógio atômico. Além disso, é essencial garantir que a tecnologia seja acessível e equitativa, para que sua influência benéfica seja sentida por todos. Em síntese, o relógio

atômico desempenha um papel essencial em nossa sociedade atual, proporcionando precisão e estabilidade sem precedentes para uma ampla gama de aplicações. Seu impacto abrange desde a ciência fundamental até as tecnologias do dia a dia que facilitam nossas vidas. À medida que avançamos, devemos continuar a valorizar e explorar os benefícios do relógio atômico, mantendo-nos atentos aos desafios éticos e garantindo que sua implementação seja justa e acessível a todos. (SHANG, 2020)

Não se pode deixar de citar que o relógio atômico desempenha um papel fundamental nos sistemas de GPS (Global Positioning System) em termos de precisão e sincronização de tempo. O GPS é um sistema de navegação por satélite que fornece informações de posicionamento precisas em todo o mundo. Para que o GPS funcione corretamente, é essencial que todos os dispositivos receptores e satélites estejam sincronizados em relação ao tempo. (GIBBLE, 2010)

Portanto, o relógio atômico desempenha um papel de extrema importância nos sistemas de GPS. Isso tem um impacto significativo em nosso cotidiano, auxiliando na navegação precisa, no monitoramento de frotas, no rastreamento de ativos, na agricultura de precisão e em muitas outras aplicações. Ademais, é importante destacar que os relógios atômicos nos satélites GPS são ajustados para levar em consideração os efeitos relativísticos, como a dilatação do tempo causada pela gravidade e a velocidade relativa. Esses ajustes são necessários para garantir que os dados de tempo sejam corretamente interpretados pelos dispositivos receptores na superfície da Terra, compensando essas diferenças. A precisão e a sincronização proporcionadas pelo relógio atômico têm um impacto significativo na vida moderna, não apenas no GPS, mas também em várias outras áreas, como telecomunicações, redes de computadores, transações financeiras, exploração espacial, pesquisa científica e muito mais. A confiabilidade e a precisão desses sistemas dependem diretamente da precisão do relógio atômico. (SHANG, 2020)

Ao passo que a tecnologia continua a evoluir, é fundamental continuar aprimorando os relógios atômicos e a sincronização do tempo para atender às demandas crescentes de precisão e confiabilidade. Além disso, a colaboração internacional e o compartilhamento de padrões de tempo são cruciais para garantir que todos os dispositivos receptores possam se beneficiar dos avanços na tecnologia de relógios atômicos, independentemente de sua localização geográfica. Em suma, o relógio atômico é uma conquista notável da ciência e da engenharia, e sua importância na sociedade

moderna, especialmente nos sistemas de GPS, é inegável. A precisão e a sincronização fornecidas pelo relógio atômico têm um impacto significativo em várias áreas de nossas vidas, tornando possível a navegação precisa, o rastreamento de ativos e uma ampla gama de aplicações científicas e tecnológicas. Como continuamos a explorar e avançar, é vital valorizar e investir na melhoria contínua dos relógios atômicos para atender às crescentes demandas da sociedade. (SHANG, 2020)

REFERÊNCIAS

ALVES, Renato Ferracini. Chafariz atômico de Cs 133. 2012. Dissertação (Mestrado em Física Básica) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.76.2012.tde-05062012-162759. Acesso em: 2022-02-23.

BEBEACHIBULI, Aida. Espectroscopia Ramsey em um chafariz atômico. 2007. Tese (Doutorado em Física Básica) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/T.76.2007.tde-19012008-090258. Acesso em: 2022-02-23.

BIPM. **Geographical distribution of the laboratories that contribute to TAI and time transfer equipment (202)**. 2023. Disponível em: www.bipm.org. Acesso em: 2 fev. 2023.

CHICRALA, Kleber. **Na vanguarda: relógio atômico na usp de são carlos. relógio atômico na USP de São Carlos**. 2019. Disponível em: <https://www2.ifsc.usp.br/portal-ifsc/relogio-atomico-na-usp-de-sao-carlos/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

EDWARDS, Jd. **IBM iSeries DB2 Julian Date: calendar date sql conversions**. Calendar Date SQL Conversions. 2020. Disponível em: <https://stackoverflow.com/questions/58867381/jd-edwards-ibm-iserries-db2-julian-date-calendar-date-sql-conversions>. Acesso em: 12 jun. 2023

GIBBLE, Kurt. Evaluating and minimizing distributed cavity phase errors in atomic clocks. **Metrologia**, v. 47, n. 5, p. 534, 2010.

IBGE. **IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS**. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2023.

MAGALHÃES, Daniel Varela. Desenvolvimento de uma fountain atômica para utilização como padrão primário de tempo. 2004. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. doi:10.11606/T.76.2004.tde-17012008-161241. Acesso em: 2022-02-23.

MULLER, Stella Torres. Padrão de frequência compacto. 2010. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. doi:10.11606/T.76.2010.tde-11052010-154900. Acesso em: 2022-02-23.

NAOE, Aline. **Relógio atômico contribui para definição internacional do tempo**. 2019. Disponível em: <http://www.saocarlos.usp.br/relogio-atomico-da-usp-contribui-para-definicao-internacional-do-tempo/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

SHANG, Haosen. Laser with 10^{13} short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock. **Optics Express**, v. 28, n. 5, p. 6868, 2020.

TAVELLA, Patrizia; THOMAS, Claudine. Comparative study of time scale algorithms. **Metrologia**, v. 28, n. 2, p. 57, 1991.

TORRES, Pedro Rodrigues. **CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE SINCRONIZAÇÃO NA INTERNET**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Informática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WIEMAN, Carl E.; HOLLBERG, Leo. Using diode lasers for atomic physics. **Review of Scientific Instruments**, v. 62 , n. 1 , p. 20, 1991.

WYNANDS, R. ; Weyers, S. Atomic fountain clocks. **Metrologia**, v.42, p. 64 , 2005.

Apêndice 1

```

from reading_file import read_data_file
from chart import display_scatter_plot
from chart import plot_average_point

print("Gráfico de dispersão com linha de tendência")

latitude_array = []
longitude_array = []
read_data_file(latitude_array, longitude_array)

print("latitude: ", latitude_array)
print()
print("longitude: ", longitude_array)

result_chart = display_scatter_plot(longitude_array,
latitude_array)
average_chart = plot_average_point(longitude_array,
latitude_array)

print("Fim da execução")

```

```

def read_data_file(latitude_array, longitude_array):
    with open('LRTE23.pos', 'r') as file:
        continue_reading = True

        for line in file:
            if line.strip() == '':
                continue_reading = False
                continue

            if continue_reading and not
line.startswith('%'):
                latitude = float(line[25:38])
                longitude = float(line[39:53])

                latitude_array.append(latitude)
                longitude_array.append(longitude)

```

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def display_scatter_plot(longitude, latitude):
    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    colors = np.linspace(0, 1, len(latitude))
    plt.scatter(longitude, latitude, c=colors,
cmap='viridis')

```

```

plt.plot(longitude, line, color="blue")

plt.xlabel("Longitude")
plt.ylabel("Latitude")
plt.title("Gráfico de Dispersão com Linha de
Tendência")

return plt.show(block=True)

def plot_average_point(longitude, latitude):
    latitude_mean = np.mean(latitude)
    longitude_mean = np.mean(longitude)

    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    plt.scatter(longitude, latitude, color='gray')

    plt.scatter(longitude_mean, latitude_mean, color='red',
marker='x', s=100)

    plt.annotate(f"({latitude_mean}, {longitude_mean})",
(longitude_mean, latitude_mean), xytext=(5, 5),
textcoords='offset points')

    plt.plot(longitude, line, color='blue')

    plt.xlabel("Longitude")
    plt.ylabel("Latitude")
    plt.title("Gráfico de Dispersão com Ponto Médio e Linha
de Tendência")

return plt.show()

```

Para a melhor compreensão temos a seguir o comentário do código:

```

#Importação dos Módulos
from reading_file import read_data_file
from chart import display_scatter_plot
from chart import plot_average_point

#Exibe um mensagem informando que será gerado um gráfico de
dispersão com linha de tendência
print("Gráfico de dispersão com linha de tendência")

#Cria duas listas vazias que serão preenchidas pela função
read_data_file
latitude_array = []

```

```

longitude_array = []
read_data_file(latitude_array, longitude_array)

#Imprime na tela as listas latitude_array e longitude_array
print("latitude: ", latitude_array)
print()
print("longitude: ", longitude_array)

#Chama as funções display_scatter_plot e
plot_average_point, passando listas longitude_array e
latitude_array como argumentos
#Os gráficos resultantes são armazenados nas variáveis
result_chart e average_chart
result_chart = display_scatter_plot(longitude_array,
latitude_array)
average_chart = plot_average_point(longitude_array,
latitude_array)

#Exibe uma mensagem indicando o fim da execução do código
print("Fim da execução")

```

```

#Define a função read_data_file que recebe as listas
latitude_array e longitude_array como parâmetros
def read_data_file(latitude_array, longitude_array):
    #Abre o arquivo LRTE23.pos em modo leitura usando a
    declaração with, que garante que o arquivo será fechado
    corretamente após o uso
    with open('LRTE23.pos', 'r') as file:
        #Define uma variável continue_reading como
        verdadeira, que será usada para controlar a leitura do
        arquivo
        continue_reading = True

        #Itera sobre cada linha do arquivo
        for line in file:
            #Verifica se a linha está em branco.
            #Se sim, define continue_reading como falso e
            continua para a próxima iteração do loop, ignorando o
            restante do código dentro do loop
            if line.strip() == '':
                continue_reading = False
                continue

            #Verifica se continue_reading é verdadeiro e se
            a linha não começa com %.
            #Isso garante que apenas as linhas válidas
            sejam processadas
            if continue_reading and not
            line.startswith('%'):

```

```

        #Extrai os valores de latitude e longitude
de cada linha e os converte em números de ponto
flutuante(float).
        latitude = float(line[25:38])
        longitude = float(line[39:53])

        #Em seguida, adiciona os valores à lista
latitude_array e longitude_array
        latitude_array.append(latitude)
        longitude_array.append(longitude)

```

```

#Importa os módulos numpy e matplotlib.pyplot com os
apelidos np e plt
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Define a função display_scatter_plot, que recebe as listas
longitude e latitude como parâmetros
def display_scatter_plot(longitude, latitude):
    #Calcula os coeficientes da reta de melhor ajuste
(linha de tendência) usando o método dos mínimos quadrados
    #A função polyfit ajusta uma linha reta aos pontos de
latitude e longitude e retorna os coeficientes
    #slope inclinação e intercept (interceptação)
    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    #Calcula os valores da linha de tendência para cada
ponto de longitude usando a equação da reta  $y = mx + c$ 
onde
    #m é inclinação
    #x é longitude
    #c é interceptação
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    #Cria uma sequência de cores para o gráfico de
dispersão
    colors = np.linspace(0, 1, len(latitude))
    #Plota os pontos de latitude e longitude no gráfico de
dispersão.
    #Cada ponto é representado por um marcador e as cores
dos pontos são definidas pela sequência colors
    #A opção cmap='viridis' define o esquema de cores a ser
usado
    plt.scatter(longitude, latitude, c=colors,
cmap='viridis')

    #Plota a linha de tendência no gráfico.
    #A função plot cria uma linha conectando os pontos
especificados pelas coordenadas de longitude e os valores
da linha de tendência

```

```

plt.plot(longitude, line, color="blue")

#Define os rótulos dos eixos x, y e o título do gráfico
plt.xlabel("Longitude")
plt.ylabel("Latitude")
plt.title("Gráfico de Dispersão com Linha de
Tendência")

#Exibe o gráfico de dispersão com a linha de tendência.
#A função show mostra o gráfico.
#O argumento block=True faz com que o programa aguarde
o fechamento do gráfico antes de continuar a execução.
return plt.show(block=True)

#Define a função plot_average_point, que recebe as listas
longitude e latitude como parâmetros
def plot_average_point(longitude, latitude):
    #Calcula a média dos valores de latitude e longitude
    usando a função mean do numpy e armazena os resultados nas
    variáveis latitude_mean e longitude_mean
    latitude_mean = np.mean(latitude)
    longitude_mean = np.mean(longitude)

    #Calcula os coeficientes da reta de melhor ajuste
    usando o método dos mínimos quadrados.
    #A função polyfit do numpy ajusta uma linha reta aos
    pontos de longitude e latitude e retorna os coeficientes
    slope (inclinação) e intercept(interceptação)
    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    #Em seguida calcula os valores da linha de tendência
    para cada ponto de longitude usando a equação da reta  $y =
    mx + c$  onde  $m$  é a inclinação(slope),  $x$  é a longitude e  $c$ 
    interceptação(intercept)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    #Plota os pontos de longitude e latitude no gráfico de
    dispersão usando a cor cinza.
    #Cada ponto é representado por um marcador
    plt.scatter(longitude, latitude, color='gray')

    #Plota o ponto médio no gráfico de dispersão.
    #O ponto é representado por um marcador vermelho em
    forma de x possui um tamanho de 100px
    plt.scatter(longitude_mean, latitude_mean, color='red',
marker='x', s=100)

    #Adiciona uma anotação ao gráfico para exibir as
    coordenadas do ponto médio.
    #A anotação é colocada nas coordenadas (longitude_mean,
    latitude_mean) com um deslocamento de 5 pontos nas direções
    x e y

```

```
plt.annotate(f"({latitude_mean}, {longitude_mean})",
             (longitude_mean, latitude_mean), xytext=(5, 5),
             textcoords='offset points')

#Plota a linha de tendência no gráfico de dispersão
#A função plot do matplotlib cria uma linha conectando
os pontos especificados pelas coordenadas de longitude e os
valores da linha de tendência
plt.plot(longitude, line, color='blue')

#Define os rótulos dos x, y e o título do gráfico
plt.xlabel("Longitude")
plt.ylabel("Latitude")
plt.title("Gráfico de Dispersão com Ponto Médio e Linha
de Tendência")

#Exibe o gráfico de dispersão com o ponto médio e a
linha de tendência.
#A função show do matplotlib mostra o gráfico na janela
atual.
return plt.show()
```

Apêndice 2

```

from reading_file import read_data_file
from chart import display_meteorological_data

print("Variação de Temperatura")

data = []

read_data_file(data)
result_chart = display_meteorological_data(data)

```

```

def read_data_file(data):
    with open('metLR59.816', 'r') as file:
        read_data = False
        for line in file:
            if line.strip() == 'END OF HEADER':
                read_data = True
            elif read_data:
                fields = line.split()
                pr = float(fields[7])
                te = float(fields[8])
                he = float(fields[9])
                data.append((pr, te, he))

```

```

import matplotlib.pyplot as plt

def display_meteorological_data(data):
    pr = [item[0] for item in data]
    te = [item[1] for item in data]
    he = [item[2] for item in data]

    plt.scatter(range(len(pr)), pr, label='PR')
    plt.scatter(range(len(te)), te, label='TE')
    plt.scatter(range(len(he)), he, label='HE')

    plt.title("Gráfico de PR, TE e HE")
    plt.xlabel("Índice")
    plt.ylabel("Valores")
    plt.legend()

    # Exibir o gráfico
    return plt.show()

```

Apêndice 3

```

from reading_file import read_data_file
from chart import display_scatter_plot
from chart import plot_average_point
from chart import plot_most_distant_points

print("Gráfico de dispersão com linha de tendência")

latitude_array = []
longitude_array = []
read_data_file(latitude_array, longitude_array)

print("latitude: ", latitude_array)
print()
print("longitude: ", longitude_array)

result_chart = display_scatter_plot(longitude_array, latitude_array)
most_distant_chart = plot_most_distant_points(longitude_array,
latitude_array)

print("Fim da execução")

```

Esse primeiro item evoca apenas as funções e passa os dados necessários para eles

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def display_scatter_plot(longitude, latitude):
    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    colors = np.linspace(0, 1, len(latitude))
    plt.scatter(longitude, latitude, c=colors, cmap='viridis')

    plt.plot(longitude, line, color="blue")

    plt.xlabel("Longitude")
    plt.ylabel("Latitude")
    plt.title("Gráfico de Dispersão com Linha de Tendência")

    return plt.show(block=True)

def plot_average_point(longitude, latitude):
    latitude_mean = np.mean(latitude)
    longitude_mean = np.mean(longitude)

    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept

    plt.scatter(longitude, latitude, color='gray')

    plt.scatter(longitude_mean, latitude_mean, color='red',
marker='x', s=100)

    plt.annotate(f"({latitude_mean}, {longitude_mean})",
(longitude_mean, latitude_mean), xytext=(5, 5),
textcoords='offset points')

    plt.plot(longitude, line, color='blue')

```

```

plt.xlabel("Longitude")
plt.ylabel("Latitude")
plt.title("Gráfico de Dispersão com Ponto Médio e Linha de
Tendência")

return plt.show()

def calculate_distances(longitude, latitude):
    center_longitude = np.mean(longitude)
    center_latitude = np.mean(latitude)
    distances = []
    for i in range(len(longitude)):
        dist = np.sqrt((longitude[i] - center_longitude)**2 +
(latitude[i] - center_latitude)**2)
        distances.append(dist)
    return distances

def plot_most_distant_points(longitude, latitude, num_points=5):
    distances = calculate_distances(longitude, latitude)
    indices = np.argsort(distances)[-num_points:] # Get indices of
most distant points

    # Plot all points in gray
    plt.scatter(longitude, latitude, color='gray')

    # Plot most distant points in red
    for i in indices:
        plt.scatter(longitude[i], latitude[i], color='red',
marker='x', s=100)
        plt.annotate(f"({latitude[i]:.4f}, {longitude[i]:.4f})",
(longitude[i], latitude[i]), xytext=(5, 5),
textcoords='offset points')

    # Calculate and plot trend line (optional)
    slope, intercept = np.polyfit(longitude, latitude, 1)
    line = slope * np.array(longitude) + intercept
    plt.plot(longitude, line, color='blue')

    # Labels and title
    plt.xlabel("Longitude")
    plt.ylabel("Latitude")
    plt.title("Gráfico de Dispersão com Pontos Mais Distantes")

return plt.show(block=True)

```

O `display_scatter_plot` mostra o gráfico e o `plot_average_point` capta os pontos médios, `plot_most_distant_points` e os pontos mais distantes e `calculate_distance` calcula a distância do centro

```

def read_data_file(latitude_array, longitude_array):
    with open('LRTE23.pos', 'r') as file:
        continue_reading = True

        for line in file:
            if line.strip() == '':
                continue_reading = False
                continue

            if continue_reading and not line.startswith('%'):
                latitude = float(line[25:38])

```

```
longitude = float(line[39:53])  
  
latitude_array.append(latitude)  
longitude_array.append(longitude)
```

Esse lê os arquivos com os dados

Apêndice 4

Main.py

```
import read_file
import display_data

data = []
furthest_indices_list = []
read_file.read_data_file(data)
result_chart_pr = display_data.display_meteorological_data_pr(data)
result_chart_te = display_data.display_meteorological_data_te(data)
result_chart_he = display_data.display_meteorological_data_he(data)

print("5 itens mais distantes da linha:")
for item in furthest_indices_list:
    print(item)
```

display data

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def display_meteorological_data_pr(data):
    pr = [item[0] for item in data]

    # Calcule os coeficientes da linha de regressão usando NumPy
    m, b = np.polyfit(range(len(pr)), pr, 1) # Ajuste linear para PR

    # Calcule as distâncias de cada ponto à linha
    distances = np.abs(pr - (m * np.arange(len(pr)) + b))

    # Encontre os índices dos 5 pontos mais distantes
    furthest_indices = np.argsort(distances)[-5:]

    # Converta os índices para uma lista de inteiros
    furthest_indices_list = furthest_indices.tolist()

    # Acesse os elementos de pr usando os índices individualmente:
    furthest_pr = [pr[i] for i in furthest_indices_list]

    # Adicione os dados originais ao gráfico:
    plt.scatter(range(len(pr)), pr, color='gray', label='PR')

    # Gere um gráfico com os 5 pontos mais distantes:
    plt.scatter(furthest_indices_list, furthest_pr, color='red',
marker='x', label='5 mais distantes')

    plt.title("Gráfico de PR")
    plt.xlabel("Índice")
    plt.ylabel("Valores")
    plt.legend()

    return plt.show()

def display_meteorological_data_te(data):
    te = [item[1] for item in data]

    # Calcule os coeficientes da linha de regressão usando NumPy
```

```

m, b = np.polyfit(range(len(te)), te, 1) # Ajuste linear para TE

# Calcule as distâncias de cada ponto à linha
distances = np.abs(te - (m * np.arange(len(te)) + b))

# Encontre os índices dos 5 pontos mais distantes
furthest_indices = np.argsort(distances)[-5:]

# Converta os índices para uma lista de inteiros
furthest_indices_list = furthest_indices.tolist()

# Acesse os elementos de te usando os índices individualmente:
furthest_te = [te[i] for i in furthest_indices_list]

# Adicione os dados originais ao gráfico:
plt.scatter(range(len(te)), te, color='gray', label='TE')

# Gere um gráfico com os 5 pontos mais distantes:
plt.scatter(furthest_indices_list, furthest_te, color='red',
marker='x', label='5 mais distantes')

plt.title("Gráfico de TE")
plt.xlabel("Índice")
plt.ylabel("Valores")
plt.legend()

return plt.show()

def display_meteorological_data_he(data):
    he = [item[2] for item in data] # Extrai HE dos dados

    # Calcule os coeficientes da linha de regressão usando NumPy
    m, b = np.polyfit(range(len(he)), he, 1) # Ajuste linear para HE

    # Calcule as distâncias de cada ponto à linha
    distances = np.abs(he - (m * np.arange(len(he)) + b))

    # Encontre os índices dos 5 pontos mais distantes
    furthest_indices = np.argsort(distances)[-5:]

    # Converta os índices para uma lista de inteiros
    furthest_indices_list = furthest_indices.tolist()

    # Acesse os elementos de he usando os índices individualmente:
    furthest_he = [he[i] for i in furthest_indices_list]

    # Gere um gráfico com os 5 pontos mais distantes:
    plt.scatter(range(len(he)), he, color='gray', label='HE')
    plt.scatter(furthest_indices_list, furthest_he, color='red',
marker='x', label='5 mais distantes (HE)')

    plt.title("Gráfico de HE")
    plt.xlabel("Índice")
    plt.ylabel("Valores")
    plt.legend()

    return plt.show()

```

readfile.py

```
def read_data_file(data):
    with open('metLR59.816', 'r') as file:
        read_data = False
        for line in file:
            if line.strip() == 'END OF HEADER':
                read_data = True
            elif read_data:
                fields = line.split()
                pr = float(fields[7])
                te = float(fields[8])
                he = float(fields[9])
                data.append((pr, te, he))
```



EESC • USP